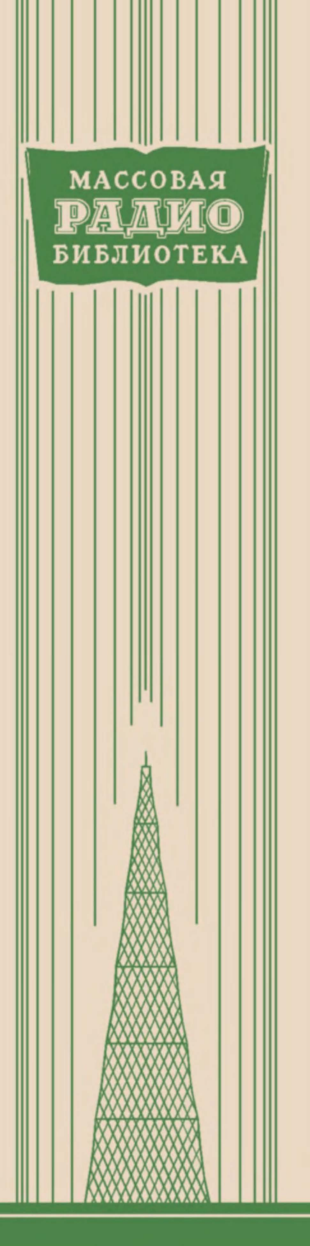


А. Г. СОБОЛЕВСКИЙ

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 308

А. Г. СОБОЛЕВСКИЙ

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В книге рассматриваются основные устройства импульсной техники—спусковые устройства, мультивибраторы, блокинг-генераторы, фантастроны, генераторы пилообразного напряжения, устройства переменной задержки импульсов и т. д. Описывается действие импульсной э. д. с. на различные электрические цепи, а также способы модуляции и демодуляции импульсов, селекция их по амплитуде, длительности и временно́му положению. Рассказано об основных импульсных измерениях.

Книга предназначена для подготовленных радиолюбителей и лиц, знакомых с общей радиотехникой.

Автор *Соболевский Анатолий Георгиевич*

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

* * * *

Редактор *Б. Х. Кривицкий* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 5/V 1958 г. Подписано к печати 15/IX 1958 г.
Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$ 8,61 п. л. Уч.-изд. л. 9,6.
Т-09221 Тираж 65000 Цена 3 р. 85 к. Зак. 1228.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Введение

Импульсная техника, как самостоятельная отрасль знаний, была вызвана к жизни бурным развитием радиотехники, разработкой импульсных методов исследований, широким внедрением в производстве автоматизации.

Сейчас уже трудно указать какую-либо область техники, где не использовались бы импульсные процессы. Они играют существенную роль в современном телевидении, многоканальной радиосвязи, в радиолокации и радионавигации. Ученые, используя импульсные методы исследования, проникают в тайны материи, математические машины, действие которых основано на использовании импульсных процессов, могут производить десятки тысяч вычислений в секунду.

Аппараты, работающие на принципах импульсной техники, подчас очень сложны, однако в каждом из них присутствуют основные импульсные устройства, при помощи которых вырабатываются или формируются электрические импульсы, осуществляется модуляция импульсов, задержка импульсов во времени, их селекция и т. д. Эти основные импульсные устройства и рассматриваются в настоящей книге.

В книге даны только те сведения, которые необходимы для понимания принципа действия этих устройств и их практической наладки. Материал излагается в порядке перехода от простейших устройств к более сложным. Путем усложнения и остроумного сочетания этих устройств могут быть решены многообразные и интересные задачи. Конечная цель книги — рассмотреть основные импульсные устройства в такой мере, чтобы радиолюбитель, конструируя их применительно к своим нуждам, собирал на них сложное радиотехническое устройство, подобно тому, как из кирпичей складывается здание. Прежде чем перейти к рассмотрению импульсных схем, надо условиться, с какими импульсами мы будем иметь дело.

Под электрическими импульсами понимают электри-

ческое напряжение или ток, действующие в течение короткого промежутка времени (рис. 1,*а*). Импульсы могут иметь самую разнообразную форму: треугольную, прямоугольную, трапецеидальную и пр. В импульсных цепях большую роль играют переходные процессы. Так, если на цепочку из соединенных последовательно сопротивления и конденсатора подать некоторое напряжение, то напряжение на конденсаторе достигнет значения этого напряжения не мгновенно, а спустя некоторое время. Это постепенное нарастание напряжения на конденсаторе и составляет переходный процесс. Таким образом, переходный процесс существенно отличается от установившегося процесса, когда напряжение на конденсаторе остается постоянным. То же самое происходит в цепях, содержащих индуктивность. А так как любая практическая электрическая цепь содержит емкости и индуктивности, то при изменении напряжения или тока в ней возникают переходные процессы.

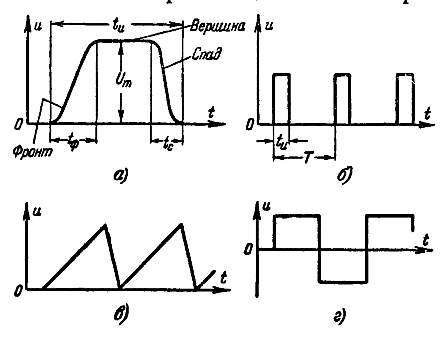


Рис. 1. Форма импульсов и переодические напряжения.

а — импульс; *б* — последовательность прямоугольных импульсов; *в* — пилообразное напряжение; *г* — прямоугольное напряжение.

Импульсная техника имеет дело с импульсами, длительность которых сравнима с длительностью вызванных ими переходных процессов. Длительность же паузы между импульсами должна быть много больше длительности импульса, чтобы к приходу следующего импульса в цепи закончились переходные процессы, вызванные предыдущим импульсом.

Отношение $\frac{T}{t_u}$ (см. рис. 1,*б*) называется **скважностью** и обозначается буквой Q.

В импульсных устройствах используются не только импульсы (рис. 1,*б*), но и периодические напряжения пилообразной, прямоугольной и другой формы (рис. 1,*в* и *г*), необходимые как для вспомогательных целей, например для формирования и управления импульсами, так и для специальных целей — при импульсных измерениях, для образования растра в телевидении и т. д.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ Э. Д. С. НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

1. Цепь *RC*

Прежде чем говорить о прохождении импульсов через цепь *RC*, рассмотрим, как изменяются ток и напряжение в этой цепи при подключении ее к источнику постоянного напряжения *U* (рис. 2, *а*).

Предположим, что в исходном состоянии батарея отсоединена от цепи (переключатель *П* в положении 1) и конденсатор *C* разряжен, т. е. напряжение u_C на нем равно нулю. Напряжение u_R на сопротивлении *R* при этом также равно нулю.

При подключении к цепи батареи (переключатель *П* в положении 2) начинается процесс заряда конденсатора *C*. Этот процесс не может произойти мгновенно по следующим причинам. Когда конденсатор заряжен, между его пластинами существует разность потенциалов и, значит, и электрическое поле, обладающее энергией. Поэтому, если предположить, что заряд конденсатора произошел мгновенно в момент подключения батареи к цепи, то и электрическое поле между его пластинами должно возникнуть мгновенно. Это, в свою очередь, означает, что и энергия электрического поля, первоначально равная нулю, мгновенно увеличилась до некоторой величины. Но для этого источник зарядного тока должен обладать бесконечно большой мощностью. В реальных условиях это невозможно, поэтому заряд (как и разряд) конденсатора протекает в течение некоторого, может быть очень малого, но конечного промежутка времени.

Ток, проходящий через конденсатор, может изменяться мгновенно (скачком), так как энергия электрического поля при этом не изменяется.

Вернемся к нашему примеру. При подключении батареи

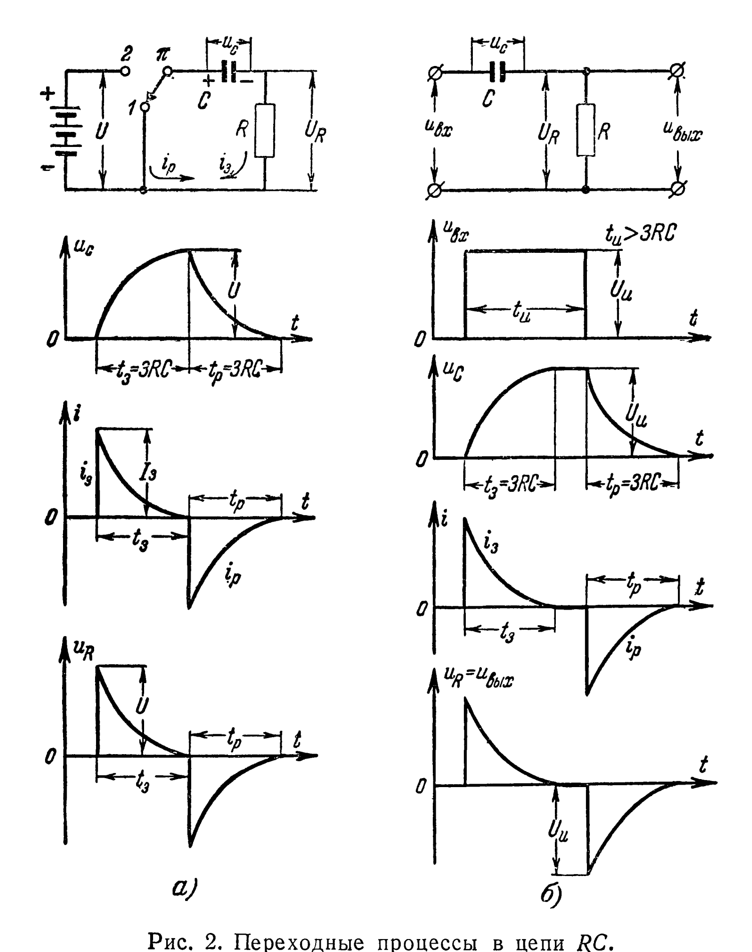


Рис. 2. Переходные процессы в цепи RC.

а — при включении и выключении постоянного напряжения; *б* — при воздействии импульса, длительность которого много больше постоянной времени цепи τ.

начинается постепенный заряд конденсатора током $i_з$. Так как конденсатор C был предварительно разряжен, то ток заряда будет равен:

$$i_з = \frac{U - u_C}{R}.$$

Напряжение u_C на конденсаторе в первое мгновение после подключения батареи равно нулю; поэтому величина тока $i_з$ заряда конденсатора будет определяться вели-

чиной сопротивления R, на котором возникнет скачок напряжения, равный э. д. с. батареи:

$$u_R = i_з R = \frac{U}{R} R = U.$$

Напряжение u_C на конденсаторе увеличивается, стремясь к напряжению U батареи. При этом напряжение u_R на сопротивлении R, равное $u_R = i_з R = U - u_C$, стремится к нулю (рис. 2,*б*). Скорость нарастания напряжения u_C и спадания u_R определяется величиной произведения RC сопротивления и емкости, которое носит название **постоянной времени** цепи и обозначается буквой τ. Чем больше τ, тем меньше скорость нарастания напряжения u_C и спадания u_R. Математически характер спадания тока заряда выражается формулой[1]

$$i_з = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}},$$

где $e = 2,72\ldots$ — основание натуральных логарифмов; t — время с момента начала заряда конденсатора.

Характер нарастания напряжения u_C на конденсаторе и спадания u_R на сопротивлении выражается формулами

$$u_R = i_з R = \frac{U}{R} R e^{-\frac{t}{RC}} = U e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$u_C = U - u_R = U - U e^{-\frac{t}{RC}} = U\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).$$

Из этих формул видно, что напряжение u_C сделается равным U, а $i_з$ и u_R спадут до нуля только через бесконечно большое время, т. е. когда $t = \infty$. На практике же считают, что конденсатор зарядился, если напряжение на нем достигло 0,95 напряжения источника. Это произойдет спустя время, равное трем постоянным времени ($t = 3RC = 3\tau$ *сек*).

Когда переходный процесс закончится (конденсатор C зарядится до $0,95U$), переведем переключатель $П$ в поло-

---

[1] Выражение $e^{-\frac{t}{RC}}$ — экспоненциальная (показательная) функция вида $y = e^x$, где $x = -\frac{t}{RC}$ — независимое переменное.

жение *1*. При этом конденсатор C окажется замкнутым на сопротивление R, и в цепи появится ток $i_р$ разряда конденсатора. Так как положительная пластина конденсатора присоединена теперь к нижнему концу сопротивления R, то направление тока разряда $i_р$ обратно направлению тока заряда $i_з$. Поэтому новый скачок напряжения u_R на сопротивлении имеет отрицательную полярность (рис. 2,*б*). Все, что говорилось о заряде конденсатора, полностью относится к его разряду: напряжение u_C экспоненциально спадает в соответствии с постоянной времени цепи; также спадают разрядный ток $i_р$ и напряжение u_R на сопротивлении R, только их полярность противоположна зарядной. Спустя $3RC$ *сек* конденсатор практически разрядится.

Такая же картина будет и в том случае, если на вход цепи подать не постоянное напряжение от батареи, а прямоугольный импульс, длительность $t_и$ которого больше длительности переходного процесса (рис. 2,*б*). Тогда от переднего фронта импульса конденсатор C начнет заряжаться и на выходе цепи (на сопротивлении R) возникнет остроконечный импульс, спадающий по экспоненциальной кривой с постоянной времени τ. Полярность этого импульса одинакова с полярностью прямоугольного входного импульса.

Спад входного прямоугольного импульса вызовет появление на выходе цепи второго остроконечного импульса, полярность которого противоположна полярности входного импульса. Таким образом, вместо одного входного прямоугольного импульса на выходе цепи RC появляются два остроконечных более коротких импульса. Расстояние между ними во времени равно длительности $t_и$ прямоугольного входного импульса.

Рассмотренная цепь RC, у которой постоянная времени τ много меньше длительности $t_и$ входного импульса ($\tau \ll t_и$) или $3RC \ll t_и$, называется **дифференцирующей**.

Рассмотрим, как изменится форма напряжения на выходе цепи RC, если ее постоянная времени станет больше длительности входного импульса, т. е. $\tau > t_и$. В этом случае прямоугольный импульс окончится раньше, чем закончится переходный процесс заряда конденсатора. В момент окончания прямоугольного импульса напряжение на кон-

денсаторе будет меньше напряжения импульса $U_и$ и равно u'_C. Тогда напряжение на выходе (рис. 3,*а*)

$$u'_R = U_и - u'_C.$$

После окончания входного импульса напряжение u'_C, до которого заряжен конденсатор, вызовет скачок отрица-

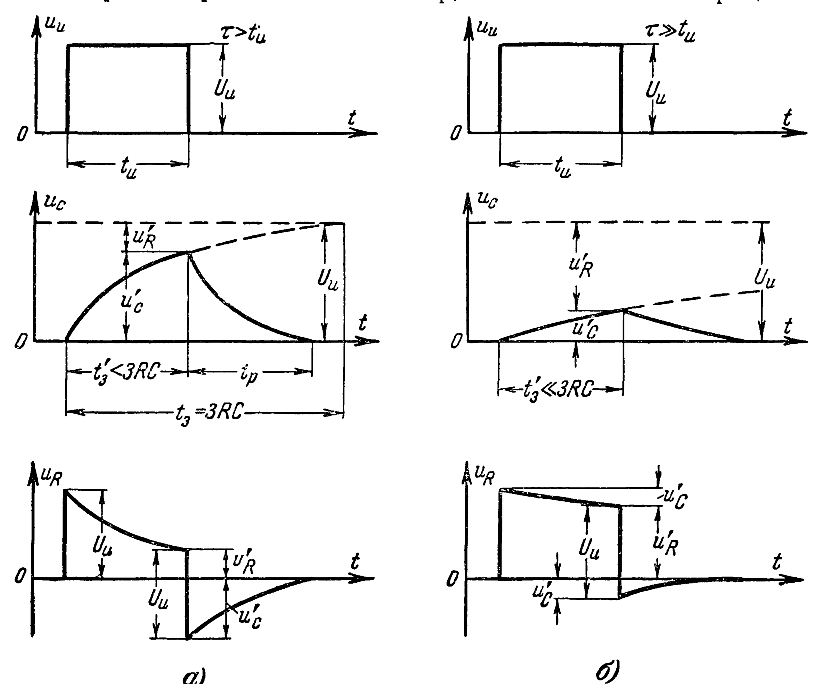


Рис. 3. Переходные процессы в цепи *RC* при воздействии прямоугольного импульса.

а) $\tau > t_и$; *б*) $\tau \gg t_и$.

тельного напряжения на сопротивлении *R*, равный $-u'_C$, т. е. напряжение на сопротивлении изменится скачком от u'_R до $-u'_C$, или

$$u'_R - (-u'_C) = U_и.$$

Далее конденсатор начинает разряжаться как обычно.

Если постоянную времени τ цепи *RC* увеличивать, то напряжение u'_R будет стремиться к значению напряжения $U_и$, а u'_C — к нулю. Наконец, при очень большой величине τ ($\tau \gg t_и$) прямоугольный импульс пройдет через цепь *RC*

практически без искажений (рис. 3,*б*). Такая цепь RC называется **переходной**.

Процесс прохождения прямоугольного импульса через цепь RC мы идеализировали, предполагая, что импульс имеет строго прямоугольную форму (время фронта и время спада равны нулю), и не учитывали влияния паразитных емкостей. На практике невозможно получить импульс с нулевым временем нарастания и спада, а во всякой реальной схеме всегда присутствуют паразитные емкости.

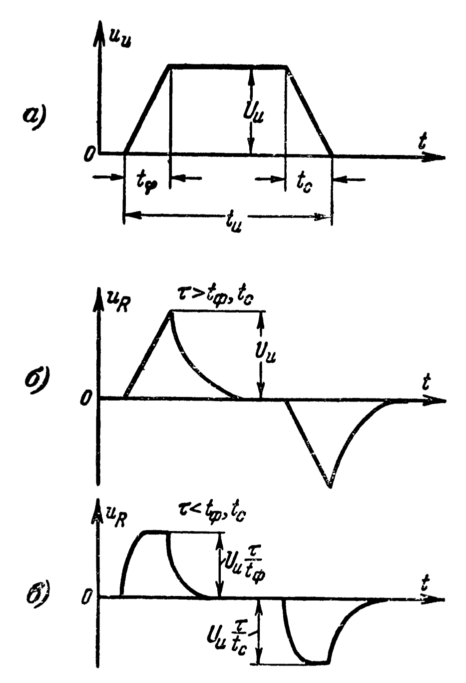


Рис. 4. Переходные процессы в цепи RC при воздействии трапецеидального импульса.

а — входной импульс; *б* — выходное напряжение при $\tau > t_ф$ и t_c; *в* — то же при $\tau < t_ф$ и t_c.

Рассмотрим вначале, как изменится форма выходных импульсов при воздействии на цепь RC импульса с временем нарастания и спада $t_ф$ и t_c (рис. 4). Если постоянная времени цепи велика по сравнению с длительностью фронта и спада входного импульса, то для них цепь будет переходной и они не искажаются (рис. 4,*б*). Но если постоянную времени цепи сделать меньше длительности фронта и спада входного импульса, то форма выходных импульсов существенно изменится. В этом случае нарастание напряжения на конденсаторе происходит очень быстро и вскоре становится равным скорости нарастания фронта входного импульса, т. е. зарядный ток конденсатора становится постоянным. Поэтому величина падения напряжения на сопротивлении R после скачка некоторое время остается постоянной (рис. 4,*в*). Амплитуда скачка при этом уменьшается во столько раз, во сколько τ меньше $t_ф$ (или t_c).

Рассмотрим влияние паразитных емкостей. Наибольшее значение имеет входная емкость $C_п$ следующего за цепью RC каскада (рис. 5,*а*). В момент действия фронта входного импульса к входу цепи оказываются подключенными последовательно конденсатор C и емкость $C_п$, т. е. образуется емкостный делитель. Конденсаторы очень быстро зарядятся до напряжений, обратно пропорциональных емкостям. При этом влиянием сопротивления R можно пренебречь и считать, что напряжение на выходе цепи

$$u_{вых} = U_и \frac{C}{C + C_п}.$$

Затем начинается заряд конденсатора C через сопротивление R и спад напряжения на выходе цепи (рис. 5,*б* и *в*). Таким образом, паразитная емкость $C_п$ уменьшает амплитуду выходных импульсов. Поэтому желательно, чтобы емкость конденсатора C составляла не менее (4—5) $C_п$. Однако нельзя выбирать эту емкость слишком большой, так как в этом случае для сохранения нужной величины постоянной времени τ придется уменьшать величину сопротивления R, а это приводит к увеличению нагрузки на источник входных импульсов (сопротивление R является для него нагрузкой). Емкость конденсатора C обычно выбирается не более 100 *пф*.

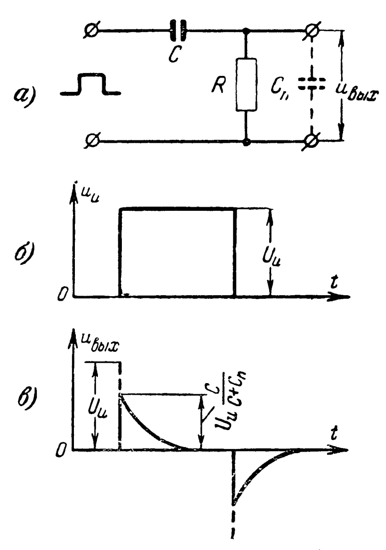


Рис. 5. Влияние паразитной емкости на переходные процессы в цепи RC.

а — схема включения; *б* — входной импульс; *в* — форма напряжения на выходе.

Выясним, как влияет внутреннее сопротивление источника входных импульсов $R_{вн}$ на форму выходных импульсов цепи RC (рис. 6,*а*). В момент появления входного импульса ток в цепи[1]

[1] В момент прохождения фронта импульса (скачка тока) напряжение на конденсаторе измениться не может, оно остается равным нулю. Это позволяет записать приведенную формулу для тока и не считаться с наличием конденсатора (как бы полагая его „сопротивление“ равным нулю).

$$i_0 = \frac{U_u}{R + R_{вн}},$$

а напряжение на выходе

$$u_{вых} = i_0 R = \frac{U_u}{R + R_{вн}} R = U_u \frac{R}{R + R_{вн}}.$$

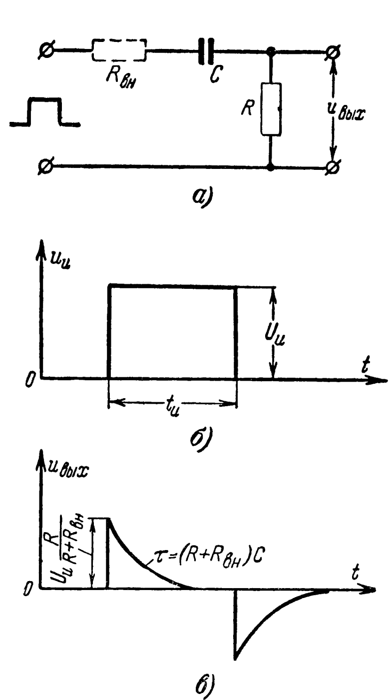


Рис. 6. Влияние внутреннего сопротивления источника входных импульсов и паразитной емкости на переходные процессы в цепи RC.

а — схема включения; *б* — входной импульс; *в* — форма напряжения на выходе.

Таким образом, сопротивление $R_{вн}$ уменьшает величину скачка напряжения на выходе цепи (рис. 6,*в*).

Далее начинается заряд конденсатора C через цепь $R + R_{вн}$ и напряжение на выходе спадает с постоянной времени $\tau = (R + R_{вн}) C$.

Все сказанное относится и к моменту окончания входного импульса.

2. Цепь *RL*

Переходные процессы в этой цепи при воздействии на нее постоянного или импульсного напряжения сходны с процессами в цепи RC.

Так, если на вход цепи RL подать прямоугольный импульс длительностью t_u (рис. 7), то ток в катушке индуктивности L, до этого равный нулю, не может возрасти скачком, так как это означало бы мгновенное изменение энергии, запасенной в магнитном поле катушки. Поэтому ток через катушку в первый момент после скачка останется равным нулю. Это значит, что падение напряжения на сопротивлении R тоже будет равно нулю и все напряжение входного импульса падает на катушке L. Затем ток через катушку начинает нарастать по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$.

Напряжение $u_L = U_и e^{-\frac{t}{\tau}}$ на катушке при этом уменьшается, а падение напряжения на сопротивлении R увеличивается. Через промежуток времени 3τ напряжение u_L

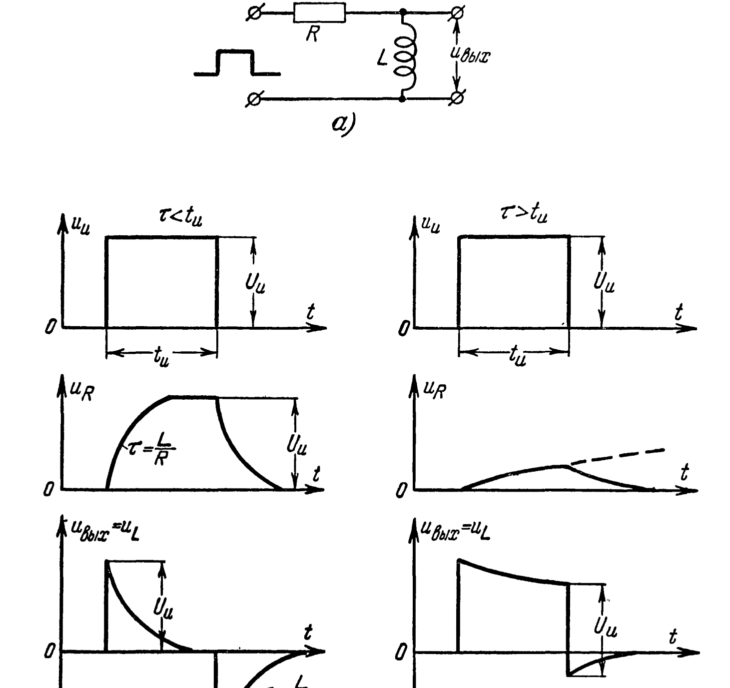


Рис. 7. Переходные процессы в цепи RL.
а — схема; *б* — форма напряжений при $\tau < t_и$ (дифференцирующая цепь RL); *в* — то же при $\tau > t_и$.

практически упадет до нуля, а напряжение u_R возрастет до величины $U_и$ (рис. 7,*б*).

Во время отрицательного перепада входного напряжения (спада входного импульса) начинается обратный процесс, при котором напряжение u_R экспоненциально уменьшается до нуля, а напряжение u_L на выходе цепи RL

скачком возрастает до значения — $U_и$, а затем экспоненциально стремится к нулю.

Если постоянная времени τ значительно превосходит длительность входного импульса, то напряжение на катушке искажается незначительно (рис. 7,*в*).

3. Цепь *LC*

Рассмотрим действие импульсной э. д. с. на параллельный колебательный контур.

Когда переключатель *П* находится в положении *1*

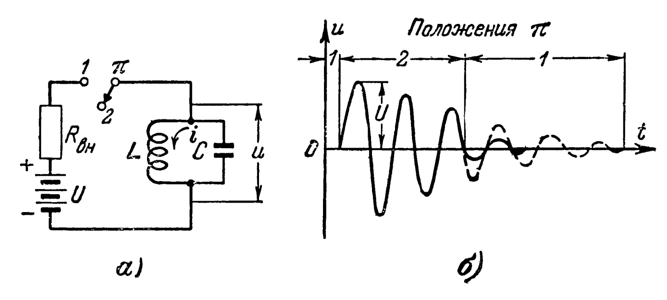


Рис. 8. Действие напряжения на параллельный колебательный контур.
а — схема включения батареи; *б* — форма напряжения на контуре в зависимости от положения переключателя.

(рис. 8,*а*), через катушку индуктивности *L* протекает ток, величина которого определяется отношением

$$i_0 = \frac{U}{R_{вн}},$$

так как сопротивление катушки обычно много меньше внутреннего сопротивления $R_{вн}$ батареи. При этом разность потенциалов на контуре равна нулю.

Если теперь отключить батарею от контура *LC* (переключатель *П* в положении *2*), то магнитная энергия, запасенная в катушке индуктивности *L*, не исчезнет мгновенно, а постепенно перейдет в энергию электрического поля конденсатора, которая, в свою очередь, через некоторое время перейдет в энергию магнитного поля катушки и т. д. Иными словами, после отключения источника постоянного напряжения ток в катушке индуктивности зарядит конденсатор, который после этого начнет разряжаться на индук-

тивность и т. д., т. е. в контуре возникнет колебательный процесс с частотой, приблизительно равной:

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Амплитуда колебаний сразу же после отключения батареи может быть определена из условия равенства энергий магнитного поля катушки $W_м=\frac{Li_0^2}{2}$ и электрического поля конденсатора $W_э=\frac{CU^2}{2}$:

$$\frac{CU^2}{2}=\frac{Li_0^2}{2},$$

откуда

$$U=i_0\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Так как в реальном колебательном контуре всегда присутствует активное сопротивление, то часть энергии контура расходуется на этом сопротивлении, и колебательный процесс постепенно затухает (рис. 8, *б*). Скорость затухания зависит от добротности Q контура. Колебания затухают тем быстрее, чем меньше добротность (шире полоса пропускания контура) и, наоборот, колебания продолжаются без существенного спада амплитуды тем дольше, чем больше Q (ýже полоса пропускания).

Если, не дожидаясь естественного затухания колебательного процесса, через некоторое время вновь подключить батарею к колебательному контуру, то колебания прекратятся из-за шунтирования контура внутренним сопротивлением $R_{вн}$ батареи.

Практически подключение к контуру источника питания для возбуждения в нем колебаний осуществляется при помощи ламповой схемы (рис. 9,*а*). Возбуждаемый таким способом контур носит название **контура ударного возбуждения**, он имеет большое практическое применение.

С его помощью можно получить **остроконечные импульсы**, аналогичные по форме импульсам, получаемым в емкостной дифференцирующей цепи (цепь RC). Контур в этом случае должен иметь затухание, равное критическому, при котором длительность переходного процесса (время установления) минимальна. Амплитуда на-

пряжения на контуре может быть вычислена по формуле

$$U_{макс}=0,37 i_{a0} \sqrt{\frac{L}{C_0}},$$

где i_{a0} — ток через лампу при нулевом напряжении на сетке.

Форма напряжения на сетке и аноде лампы представлена на рис. 9, *б*.

Выбор режима производится при помощи сопротивления r (рис. 9, *а*).

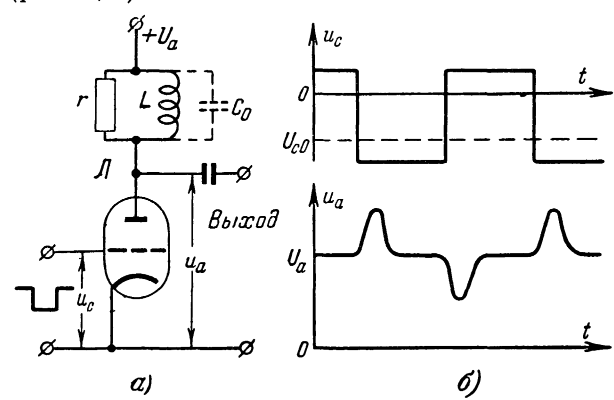


Рис. 9. Получение остроконечных импульсов при помощи контура ударного возбуждения.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжения на входе и выходе схемы.

Перед дифференцирующей RC цепью контур имеет то преимущество, что позволяет получить амплитуду импульсов бо́льшую, чем величина напряжения источника питания. Такие импульсы очень удобны, например, для запуска различных устройств.

Измерение малых отрезков времени обычно производится электронно-лучевым осциллографом, на экран которого наносится электронный «масштаб времени». Это делается при помощи специального устройства, вырабатывающего остроконечные импульсы строго определенной частоты повторения, которые подаются на катод или управляющий электрод осциллографической трубки, в результате чего на ее экране появляются светлые или темные метки — временной масштаб.

Схема одного из устройств, вырабатывающая такие масштабные импульсы, приведена на рис. 10. В ней используется контур ударного возбуждения.

Схема работает следующим образом. Когда на сетку левого по схеме триода лампы $Л_1$ поступает отрицательный прямоугольный импульс, триод запирается. В результате прекращения тока в контуре LC возникают слабо затухающие колебания, которые затем в ограничительных каскадах (см. гл. 2) превращаются в прямоугольные импульсы и дифференцируются в анодной цепи правой половины лампы $Л_2$. На выходе устройства появляются остро-

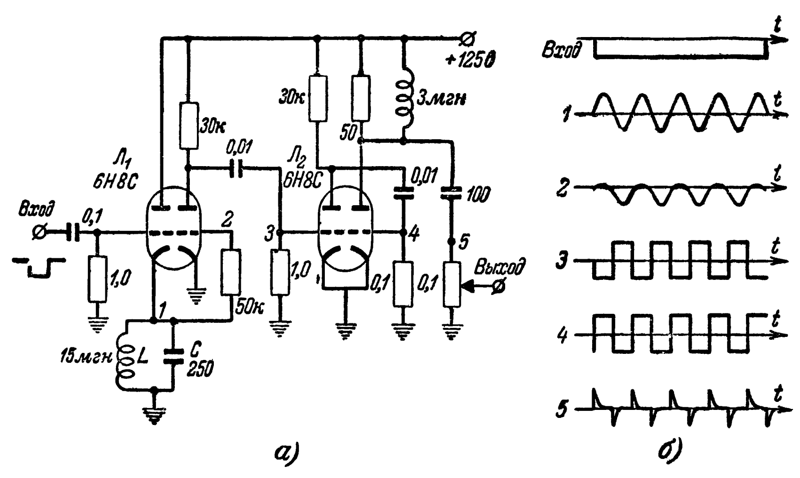


Рис. 10. Генератор масштабных меток с контуром ударного возбуждения.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений в различных точках схемы.

конечные импульсы чередующейся полярности, соответствующие полупериодам колебаний в контуре LC ударного возбуждения. Эти импульсы подаются на осциллограф. Временно́й интервал между соседними светлыми или темными метками на экране равен периоду колебаний в контуре ударного возбуждения. Чтобы этот интервал был равен 1 *мксек*, частота контура должна равняться:

$$f_0 = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{ } гц = 1 \text{ } Мгц.$$

При добротности контура порядка 100 на экране появляется около 30 меток.

Генерирование прямоугольных импульсов определенной длительности при помощи контура ударного возбуждения производится схемой, показанной на рис. 11. В исходном положении лампа $Л_2$ открыта.

Лампа $Л_1$ закрыта за счет положительного напряжения на катоде, образованного прохождением тока лампы $Л_2$ через сопротивление R_1, и отпирается положительным импульсом, поступающим на ее управляющую сетку. При этом напряжение на ее аноде уменьшается. Заряженный ранее конденсатор C_1 начинает разряжаться через лампу $Л_1$ и контур LC, возбуждая в нем колебания. Первый отрицательный полупериод создает на управляющей сетке лампы $Л_2$ отрицательное напряжение, запирающее лампу; напряжение на аноде лампы при этом увеличивается. Одна-

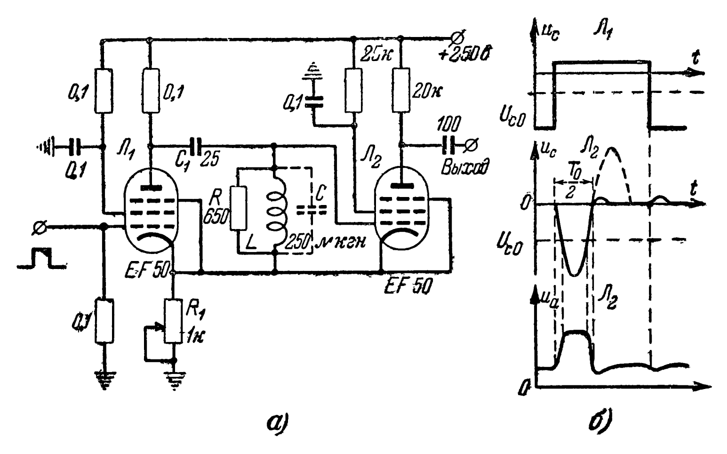


Рис. 11. Генератор прямоугольных импульсов, использующий контур ударного возбуждения.
а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

ко, как только отрицательный полупериод кончается и напряжение на управляющей сетке лампы достигает потенциала отпирания, лампа вновь открывается. Сопротивление участка сетка — катод уменьшается и шунтирует контур, в результате чего возникшие в нем колебания быстро затухают. Схема возвращается в исходное состояние. Таким образом, на аноде лампы $Л_2$ возникает положительный импульс, длительность которого определяется параметрами колебательного контура LC (рис. 11,*б*). Сопротивлением R_1 в цепи катода лампы $Л_1$ регулируется величина положительного выброса напряжения на управляющей сетке лампы $Л_2$ в момент срыва колебаний в контуре LC и отрицательного на ее аноде.

4. Электрические линии

Электрические линии могут быть короткими и длинными. Деление их на длинные и короткие условно и вызвано необходимостью учитывать конечную скорость распространения электрической энергии вдоль линии.

Предположим, что в колебательный контур включен генератор, длина волны которого много больше общей длины провода, которым намотана катушка индуктивности контура. Естественно, что в этом случае можно не считаться с конечной скоростью распространения электрической энергии и полагать, что ток в любом сечении провода катушки будет один и тот же. Такой колебательный контур состоит из сосредоточенной индуктивности, емкости и сопротивления.

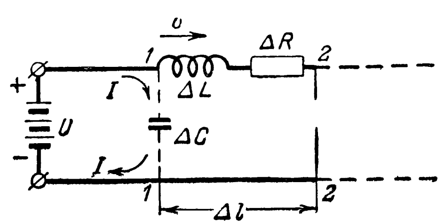


Рис. 12. Процессы в бесконечно длинной линии при включении в нее источника постоянного напряжения.

Иное дело, если длина волны генератора станет соизмерима или даже меньше общей длины провода катушки. Тогда в один и тот же момент времени ток в разных сечениях провода будет неодинаков, и надо рассматривать этот же контур как длинную электрическую линию с распределенными постоянными.

Итак, одна и та же электрическая линия может быть и длинной и короткой в зависимости от соотношения ее геометрических размеров с длиной волны.

Рассмотрим процессы, происходящие в бесконечно длинной линии (рис. 12) при включении в нее источника постоянного напряжения. Уже само название линии говорит о том, что электрическая волна, распространяющаяся вдоль линии, никогда не достигнет ее конца. Такая линия не существует на практике, но процессы, происходящие в ней, помогут нам в дальнейшем выяснить законы, действующие в практических длинных линиях.

После включения в линию батареи волна напряжения U и тока I начинает распространяться вдоль линии, заряжая элементарные распределенные емкости $\Delta C = C_{пог}\ \Delta l$, где $C_{пог}$ — погонная емкость, приходящаяся на 1 *м* длины линии, а Δl—длина рассматриваемого элементарного уча-

стка. Скорость распространения электрической волны будет:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t},$$

где Δt — время, в течение которого волна переместится из сечения *1-1* линии в сечение *2-2*, т. е. на расстояние Δl.

Скорость распространения v волны напряжения U зависит от величины распределенных индуктивностей ΔL и емкостей ΔC. В индуктивностях возникает противодействующая э. д. с. самоиндукции, поэтому напряжение U равно скорости изменения э. д. с. самоиндукции за промежуток времени Δt:

$$U = \frac{I \Delta L}{\Delta t} = L_{пог} I \frac{\Delta l}{\Delta t},$$

где $L_{пог}$ — погонная индуктивность.

Заряд q распределенной емкости ΔC током I равен произведению $I\Delta t$. Так как емкость есть отношение заряда к напряжению, то

$$\Delta C = \frac{I \Delta t}{U} \quad \text{или} \quad U = I \frac{\Delta t}{C_{пог} \Delta l}.$$

Мы получим два выражения для напряжения U. Приравняв эти выражения, найдем зависимость скорости распространения электромагнитной волны от параметров линии:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_{пог} C_{пог}}}.$$

Из выведенных формул можно найти сопротивление линии, равное отношению напряжения к току в линии:

$$\frac{U}{I} = \frac{L_{пог} I \Delta l}{I \Delta t} = L_{пог} \frac{\Delta l}{\Delta t} = L_{пог} \frac{1}{\sqrt{L_{пог} C_{пог}}} = \sqrt{\frac{L_{пог}}{C_{пог}}}.$$

Такое сопротивление линия оказывает бегущей по ней волне. Поэтому оно называется в о л н о в ы м и обозначается буквой W. Если линию разорвать на некотором расстоянии l от начала (рис. 13) и включить в разрыв сопротивление R, равное волновому ($R = W$), то после того, как через промежуток времени $t = \frac{l}{v}$ волна достигнет этого сопротивления, в линии начнет протекать постоянный ток $I = \frac{U}{R}$

и никакого отражения волны от сопротивления R не произойдет. Таким образом, линия, замкнутая на сопротивление, равное волновому, ведет себя так же, как и бесконечно длинная линия.

Рассмотрим теперь процессы в линии, если она замкнута на сопротивление, не равное волновому. Предположим вначале, что линия разомкнута, т. е. $R = \infty$ (рис. 14). Тогда после подачи в линию напряжения U по ней начнет распространяться волна напряжения u_n и тока i_n. Для простоты будем считать, что внутреннее сопротивление батареи равно волновому сопротивлению линии. Поэтому после подключения батареи ее напряжение распределится поровну между ее внутренним сопротивлением $R_{вн}$ и сопротивлением линии W, т. е. волна напряжения в линии равна $u_n = \frac{U}{2}$, а волна тока $i_n = \frac{U}{2W}$.

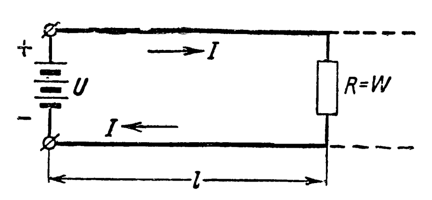


Рис. 13. Электрическая линия, замкнутая на сопротивление R, равное волновому ($R = W$).

Когда через промежуток времени $t = \frac{l}{v}$ волна достигнет конца линии, то на нем будет происходить накапливание электрического заряда. При этом результирующий ток на конце линии должен быть равен нулю. Это может быть только в том случае, если предположить, что от разомкнутого конца линии происходит отражение волны i_o, равной по величине, но противоположной по знаку падающей волне тока, только что пришедшей к концу:

$$i_o = -i_n.$$

Связанная с этой отраженной волной тока отраженная волна напряжения u_o определится как

$$u_o = -i_o W = i_n W = \frac{U}{2W} W = \frac{U}{2}.$$

Следовательно, отраженная волна напряжения равна по величине и знаку прямой волне: $u_n = u_o$.

Когда отраженные волны напряжения и тока дойдут до входа линии, они встретят сопротивление $R_{вн}$ источника напряжения, равное волновому сопротивлению линии. По-

этому никаких новых отражений не возникнет. Таким образом, через промежуток времени $t = 2\frac{l}{v}$ в линии установится постоянное напряжение U. Ток в линии будет равен нулю.

Замкнем теперь линию накоротко (рис. 15), т. е. положим $R = 0$. Пока волны напряжения и тока не дошли до

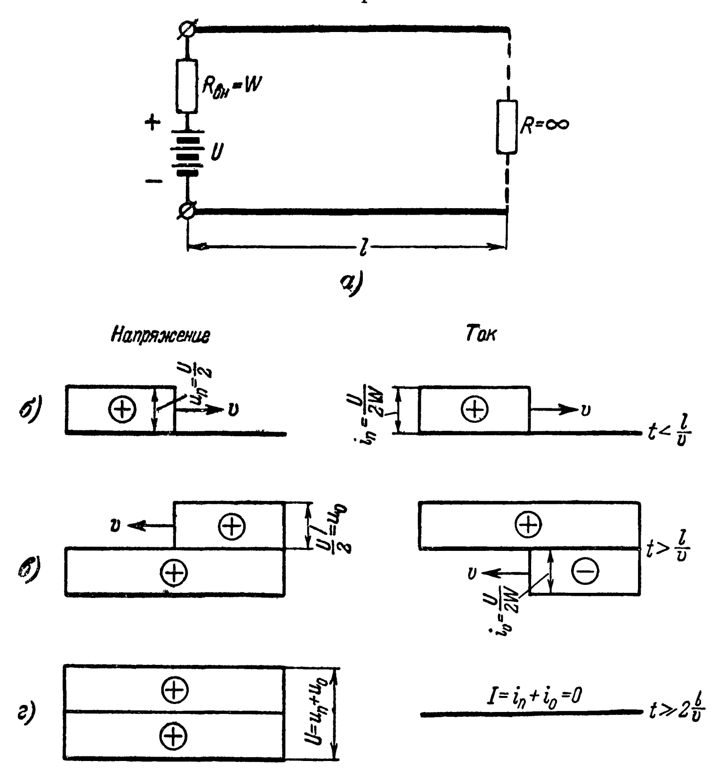


Рис. 14. Процессы в разомкнутой линии ($R = \infty$).

а — схема; *б* — диаграммы напряжения и тока в линии при $t < \frac{l}{v}$; *в* — то же при $t > \frac{l}{v}$; *г* — то же при $t \geqslant 2\frac{l}{v}$.

замкнутого конца, все процессы в короткозамкнутой линии будут протекать так же, как и в разомкнутой, т. е. в линии возникнут волны $u_n = \frac{U}{2}$ и $i_n = \frac{U}{2W}$. Суммарное напряжение на замкнутом конце линии должно быть равно

нулю. Поэтому, когда через промежуток времени $t = \frac{l}{v}$ волна напряжения достигнет замкнутого конца, возникает отраженная волна напряжения, равная по величине и противоположная по знаку прямой волне:

$$u_o = -u_n = -\frac{U}{2}.$$

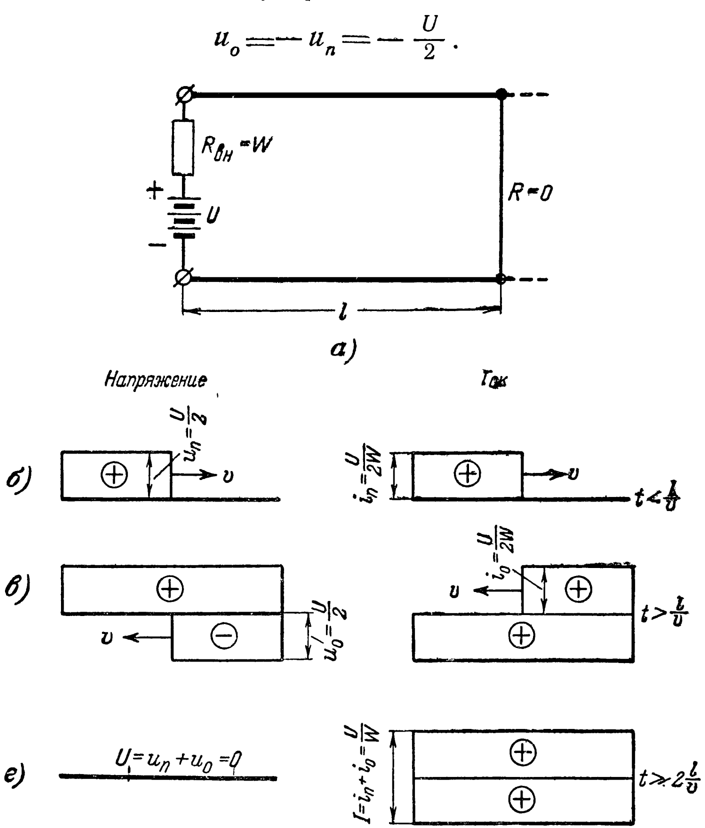


Рис. 15. Процессы, происходящие в короткозамкнутой линии ($R = 0$). *а* — схема; *б* — диаграммы напряжения и тока в линии при $t < \frac{l}{v}$; *в* — то же при $t > \frac{l}{v}$; *г* — то же при $t \geqslant 2\frac{l}{v}$.

С этой отраженной волной напряжения связана отраженная волна тока:

$$i_o = -\frac{u_o}{W} = -\left(-\frac{U}{2W}\right) = \frac{U}{2W}.$$

Таким образом, $i_o = i_n$.

Когда отраженные волны напряжения и тока вернутся к началу линии, замкнутому на сопротивление $R_{вн}=W$, в линии будет протекать постоянный ток $I=\frac{U}{W}$ и переходные процессы закончатся.

Предположим теперь, что линия замкнута на сопротивление R, не равное волновому сопротивлению. После включения напряжения в линии будут распространяться падающие волны напряжения и тока, аналогичные волнам в разомкнутой и короткозамкнутой линиях, т. е. $u_n=\frac{U}{2}$ и $i_n=\frac{U}{2W}$. После того как через промежуток времени $t=\frac{l}{v}$ волны достигнут сопротивления нагрузки R, возникнут отраженные волны напряжения u_o и тока i_o. По закону Ома на конце линии должно быть выдержано равенство $\frac{U}{I}=R$. Так как $U=u_n+u_o$, то $u_o=U-u_n$. Напряжение U можно выразить через ток и сопротивление:

$$U=IR=(i_n+i_o)R,$$

поэтому

$$u_n+u_o=(i_n+i_o)R,$$

откуда

$$u_o=(i_n+i_o)R-u_n.$$

Заменив i_n, i_o и u_n их значениями:

$$i_n=\frac{U}{2W}, \quad i_o=-\frac{u_o}{W} \text{ и } u_n=\frac{U}{2},$$

получим:

$$u_o=\frac{U}{2}\cdot\frac{R-W}{R+W}=\frac{U}{2}K; \quad i_o=-\frac{u_o}{W}=-\frac{U}{2W}K,$$

где $K=\frac{R-W}{R+W}$ — коэффициент отражения.

Если сопротивление нагрузки равно нулю ($R=0$), то $K=-1$ и $u_o=-\frac{U}{2}$, а $i_o=\frac{U}{2W}$. При $R=W$, $K=0$ и отражений не происходит, так как u_o и i_o равны нулю. Наконец, при $R=\infty$ $K=1$ и $u_o=\frac{U}{2}$, а $i_o=-\frac{U}{2W}$.

До сих пор мы рассматривали воздействие на длинную электрическую линию постоянного напряжения U. Соотношения между током и напряжением, а также законы отражения от нагрузки линии, найденные для постоянного напряжения, останутся в силе и для импульсного напряжения.

Предположим, что на вход разомкнутой линии поступает положительный импульс. Коэффициент отражения

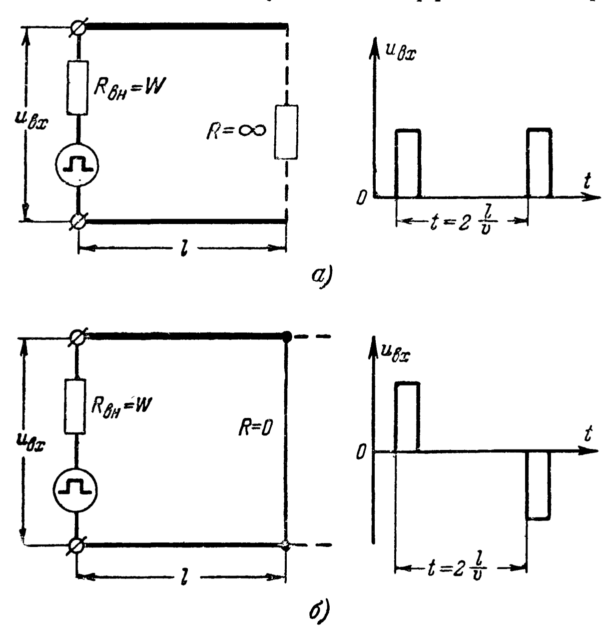


Рис. 16. Воздействие импульсов на длинную линию.
а — случай разомкнутой линии; *б* — случай короткозамкнутой линии.

разомкнутой линии равен $K=1$. Поэтому через промежуток времени $t=2\frac{l}{v}$ импульс вернется к началу линии с той же полярностью и амплитудой (рис. 16,*а*).

При воздействии положительного импульса на короткозамкнутую линию ($K=-1$) импульс вернется к началу линии тоже через промежуток времени $t=2\frac{l}{v}$ с той же амплитудой, но с обратной полярностью (рис. 16,*б*).

Если линия будет нагружена на сопротивление R, не равное W, то амплитуда и полярность импульса, вернувше-

гося к началу линии через время $t=2\frac{l}{v}$, будут изменяться в зависимости от величины коэффициента отражения K. При $R=W$ ($K=0$) импульс, дойдя до нагрузки, выделится на нагрузочном сопротивлении.

В реальных линиях имеется затухание, вследствие чего амплитуда отраженных импульсов, возвратившихся к началу линии, будет меньше исходных.

Разберем более общий случай, когда внутреннее сопротивление источника импульсов не равно волновому, $R_{вн} \neq W$. Тогда напряжение источника распределится между сопротивлением линии и внутренним сопротивлением этого источника и падающая волна напряжения будет:

$$u_n = i_n W = \frac{U}{R_{вн} + W} W.$$

Когда волна дойдет до конца линии, то в зависимости от сопротивления нагрузки и, следовательно, коэффициента отражения K произойдет отражение волны. Предположим, что линия короткозамкнутая (т. е. $K=-1$). Тогда отражение произойдет с переменой знака, но с той же амплитудой. Придя к началу линии, отраженный импульс встретит внутреннее сопротивление источника, для примера, меньшее W ($K < 0$). Поэтому он отражается от начала линии, изменив полярность и в $|K|$ раз амплитуду, и начнет двигаться со скоростью v к концу линии, превратившись уже во вторую падающую волну напряжения. Дойдя до конца линии, эта волна отразится от него и вернется к началу линии с той же амплитудой, но с обратным знаком. Здесь вновь произойдет перемена полярности и уменьшение амплитуды в $|K|$ раз и возникнет третья падающая волна. Всякий раз, когда отраженный импульс будет возвращаться к началу линии, часть его энергии будет поглощаться на сопротивлении $R_{вн}$. Теоретически так будет продолжаться бесконечно долго, однако в реальной линии, в которой всегда есть потери энергии, процесс прекратится уже после нескольких отражений.

Электрическую линию можно применить для задержки импульсов во времени, пользуясь тем, что электромагнитная энергия распространяется вдоль линии с определенной скоростью. Скорость распространения электромагнитной волны вдоль электрического кабеля (линии) зависит главным образом от диэлектрической проницаемости среды

между проводниками. Для обычного коаксиального кабеля время задержки (в секундах) может быть подсчитано по формуле

$$t_з = 0{,}33 \cdot 10^{-10} l \sqrt{\varepsilon}.$$

где ε — диэлектрическая постоянная;
l — длина, *см*.

Для задержки импульса в такой линии на 1 *мксек* длина кабеля должна быть около 200 *м*. Такие громоздкие линии неудобны и не применяются на практике.

Для задержки импульсов применяются искусственные линии, которые делятся на электрические и ультразвуковые. Первые предназначены для задержки импульсов на время от сотых долей микросекунды до 10—20 *мксек*, а вторые — для получения значительно большей задержки (тысячи микросекунд).

В электрических линиях задержка обусловливается переходными процессами в элементах линии. В ультразвуковых линиях вначале производится преобразование энергии импульса в механическое возмущение какой-либо среды, например воды, ртути и т. п. Скорость распространения возмущения в такой среде много меньше скорости распространения электрической энергии и определяется сотнями метров в секунду (а не сотнями километров в секунду, как в электрических линиях). Поэтому такие устройства невелики по размерам. Затем механическое возмущение вновь преобразуется в электрический импульс, задержанный во времени.

Электрические искусственные линии бывают с распределенными и сосредоточенными постоянными.

Обычно линия задержки с распределенными постоянными выполняется в виде кабеля, внутренняя жила которого свита в спираль и надета на стержень из изоляционного материала (рис. 17,*а*). Спираль покрывается диэлектрическим заполнителем, поверх которого надевается медная оплетка, являющаяся вторым проводником кабеля. Снаружи все закрывается защитной оболочкой. Конструкция кабеля во многом зависит от его волнового сопротивления. Последнее желательно иметь возможно большим, так как входное сопротивление кабеля, равное волновому, обычно является нагрузочным сопротивлением выходной лампы устройства, работающего на этот кабель. Поэтому уменьшение волнового сопротивления может вызвать уменьшение

напряжения на входе линии. Поэтому уменьшение волнового сопротивления может вызвать уменьшение напряжения на входе линии. Волновое сопротивление линии определяется отношением

$$W=\sqrt{\frac{L_{пог}}{C_{пог}}}.$$

Поэтому конструировать кабель желательно так, чтобы увеличение времени задержки происходило главным образом за счет роста погонной индуктивности $L_{пог}$.

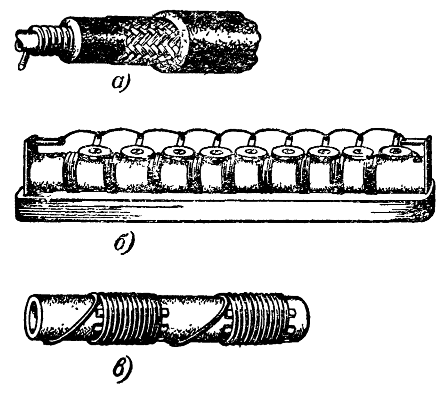


Рис. 17. Конструкции искусственных линий задержки импульсов.

а — однородная линия задержки; *б* — линия задержки с сосредоточенными постоянными; *в* — секционированная линия задержки, состоящая из взаимосвязанных катушек (распределенная емкость образуется обмоткой и несколькими полосками металлической фольги, проложенными под катушками).

Погонная индуктивность такой линии-кабеля может быть подсчитана по формуле, выражающей индуктивность цилиндрической катушки:

$$L_{пог}=\frac{\pi^2 d_{cp}^2}{l}10^{-9}\ гн/см,$$

где d_{cp} — средний диаметр спирали, *см*;

l — шаг намотки, *см*.

Погонная емкость зависит от конфигурации линии, диэлектрика и т. п. Она мало зависит от частоты и обычно составляет 15—20 *пф/см*.

Подобные линии имеют задержку на сантиметр длины порядка сотых долей микросекунды при волновом сопротивлении от десятков до тысяч ом.

Линия задержки с сосредоточенными постоянными схематически изображена на рис. 18,*а*. Она представляет собой многоячейковый фильтр нижних частот с Т-образными ячейками (рис. 18,*б*). Известно, что если через фильтр нижних частот пропустить синусоидальное напряжение, то оно окажется сдвинутым по фазе на угол $\Delta\varphi = 2\pi f \sqrt{LC}$ и соответственно по времени на $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$. Величину Δt мож-

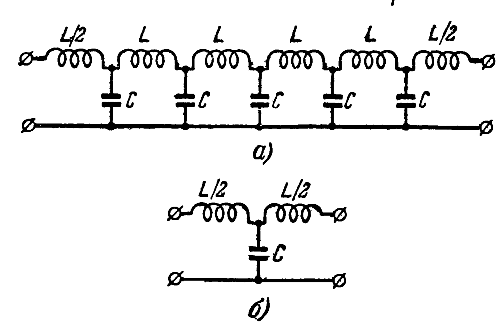


Рис. 18. Искусственная линия задержки.
а — принципиальное устройство; *б* — ячейка линии.

но считать временем задержки фильтра. Так как линия состоит из n ячеек-фильтров, то соответственно время задержки всей линии составляет:

$$t_з = \frac{n 2\pi f \sqrt{LC}}{2\pi f} = n\sqrt{LC}.$$

Приведенные соотношения действительны только для низких частот, много меньших частоты среза $f_{ср}$ фильтра. По мере увеличения частоты синусоидального напряжения, проходящего через фильтр, эти соотношения изменяются.

Вспомним, что для неискаженной передачи импульса не должны изменяться соотношения между амплитудами и фазовым сдвигом составляющих его синусоидальных колебаний. Первое требование может быть выполнено в том случае, если ячейки-фильтры линии задержки пропустят все частоты, составляющие импульс, без изменения соотношения их амплитуд, т. е. амплитудно-частотная характеристика ячеек-фильтров равномерна для всех частот. Второе требование будет выполнено в том случае, если сдвиг по фазе для каждой составляющей при прохождении через фильтр будет пропорционален ее частоте. В этом случае временной сдвиг, равный $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$, будет для всех частот

одним и тем же, т. е. фазово-частотная характеристика ячеек-фильтров должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат.

Однако практически выполнить ячейки-фильтры с такими характеристиками невозможно. Через фильтр нижних частот без ослабления пройдут только колебания низкой частоты. По мере увеличения частоты колебаний вблизи частоты среза f_{cp} фильтра амплитуды их будут все более ослабляться, пока, наконец будет достигнуто полное затухание. Поэтому невозможно пропустить через линию с сосредоточенными постоянными без ослабления амплитуд все бесконечно большое количество синусоидальных колебаний, составляющих, например, прямоугольный импульс. Чтобы искажения импульса не были значительны, линия должна пропустить без существенного ослабления амплитуд частоты хотя бы в пределах от нуля до $\frac{2 \div 4}{t_u}$, где t_u — длительность импульса, т. е.

$$f_{cp} \approx \frac{2 \div 4}{t_u},$$

или, если считать, что $f_{cp} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$, то $\frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \approx \frac{2 \div 4}{t_u}$.

Волновое сопротивление ячеек-фильтров, равное на низких частотах $\sqrt{\frac{L}{C}}$, с ростом частоты изменяется. Это приводит к рассогласованию линии с сопротивлением нагрузки, а следовательно, к дополнительному ослаблению амплитуд высокочастотных составляющих импульса.

Фазовая характеристика линии нелинейна. По мере приближения к частоте f_{cp} наклон ее увеличивается, и это вызывает увеличение времени задержки высокочастотных составляющих относительно низкочастотных.

Из полученного ранее соотношения $t_з = n\sqrt{LC}$ при условии, что сопротивление нагрузки $R_н$ линии обычно равно волновому сопротивлению линии $W = \sqrt{\frac{L}{C}}$, а также что $\frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \approx \frac{2 \div 4}{t_u}$, можно получить:

$$n = \frac{t_з}{\sqrt{LC}}; \quad L = \frac{1}{2 \div 4} \cdot \frac{t_u R_н}{n}; \quad C = \frac{1}{2 \div 4} \frac{t_u}{R_н n}.$$

Иногда для улучшения свойств линии с сосредоточенными постоянными используют взаимную индуктивную

связь между соседними ячейками-фильтрами. Такие линии сложнее в конструктивном отношении и требуют тщательной регулировки. Конструкции линий задержки показаны на рис. 17,*б* и *в*.

Для получения задержек до 1 000 *мксек* применяются ультразвуковые линии задержки с жидкостной или твердой передающей средой.

Первые представляют собой узкий сосуд, наполненный водой или ртутью, с обоих концов которого расположены кварцевые пластины. К одной из них подводится задерживаемый импульс, предварительно преобразованный в пакет высокочастотных (10—15 *Мгц*) колебаний. Под их воздействием кварцевая пластина начинает колебаться, вызывая в жидкости возникновение механических ультразвуковых волн. Когда волны достигнут приемной кварцевой пластины, они преобразуются ею в электрические колебания. После детектирования на выходе линии появится импульс, задержанный относительно входного на время, равное пробегу ультразвуковой волны от одной кварцевой пластины до другой. Скорость распространения волн при $T=20°$ С составляет для воды 6,75 *мксек/см*, ртути — 6,9 *мксек/см*. Чтобы увеличить это время, линию делают коленчатой, заставляя волну многократно отражаться и совершать зигзагообразный путь, наподобие пути лучей света в призматическом бинокле. Аналогично работают линии задержки с твердым заполнителем.

Иногда для задержки импульсов во времени используется явление магнитострикции. Оно состоит в том, что некоторые металлы (например, никель) изменяют свои размеры при воздействии магнитного поля. Магнитострикционная линия состоит из длинного стержня, на который надеваются две катушки: передающая и приемная. Под действием импульса тока, проходящего через передающую катушку, в стержне возникают ультразвуковые волны сжатия и растяжения, распространяющиеся в обе стороны. Концы ленты закрепляются в поглощающих прокладках, поэтому одна из волн тут же затухает, а вторая двигается вдоль стержня к приемной катушке, обычно подмагничиваемой. Волна возбуждает в ней электрический импульс, задержанный относительно входного на время пробега ультразвуковой волны от одной катушки до другой. Регулируя расстояние между катушками, можно изменять величину задержки, составляющей в случае применения никелевой ленты приблизительно 2 *мксек/см*.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОГРАНИЧИТЕЛИ

Ограничителем называется устройство, на выходе которого напряжение после достижения определенного уровня остается постоянным, несмотря на дальнейшее изменение входного напряжения. Если выходное напряжение остается постоянным после нарастания входного напряжения, то такой ограничитель называется ограничителем по максимуму.

Величина входного напряжения, выше которого (рис. 19, *а*) выходной сигнал остается неизменным, называется порогом ограничения сверху. Если выходное напряжение остается постоянным после уменьшения входного до некоторой величины, то такой ограничитель называется ограничителем по минимуму, а эта величина — порогом ограничения снизу (рис. 19, *б*). Пока напряжение на выходе не достигло порога ограничения, оно по форме повторяет входное напряжение.

Характеристика ограничителя представляет собой ломаную линию. У ограничителей по максимуму этот излом расположен сверху, а у ограничителей по минимуму — снизу.

Существуют ограничители, у которых характеристика изломана сверху и снизу. Такие устройства производят ограничение и по максимуму и по минимуму и называются двусторонними ограничителями (рис. 19, *в*).

Ограничители широко применяются в импульсных устройствах. С их помощью осуществляется отбор импульсов по полярности. Например, если требуется из серии разнополярных импульсов выделить только положительные, то их пропускают через ограничитель по минимуму с нулевым порогом ограничения. При этом на выходе появятся только положительные импульсы. При помощи ограничителя можно осуществить отбор импульсов и по амплитуде. При этом из ряда импульсов через ограничитель по минимуму пройдут только те импульсы, амплитуда которых превышает уровень ограничения. Ограничители могут быть использованы для срезания импульсов на определенном уровне ограничения амплитуды.

Весьма часто ограничитель применяется для получения прямоугольных импульсов из синусоидального напряжения. Синусоидальное напряжение при помощи двустороннего ограничения превращается в трапецеидальное (рис. 19,*в*).

С увеличением амплитуды синусоидального напряжения и уменьшением уровней ограничения выходные импульсы по форме все больше приближаются к прямоугольным.

Рассмотрим различные схемы ограничителей.

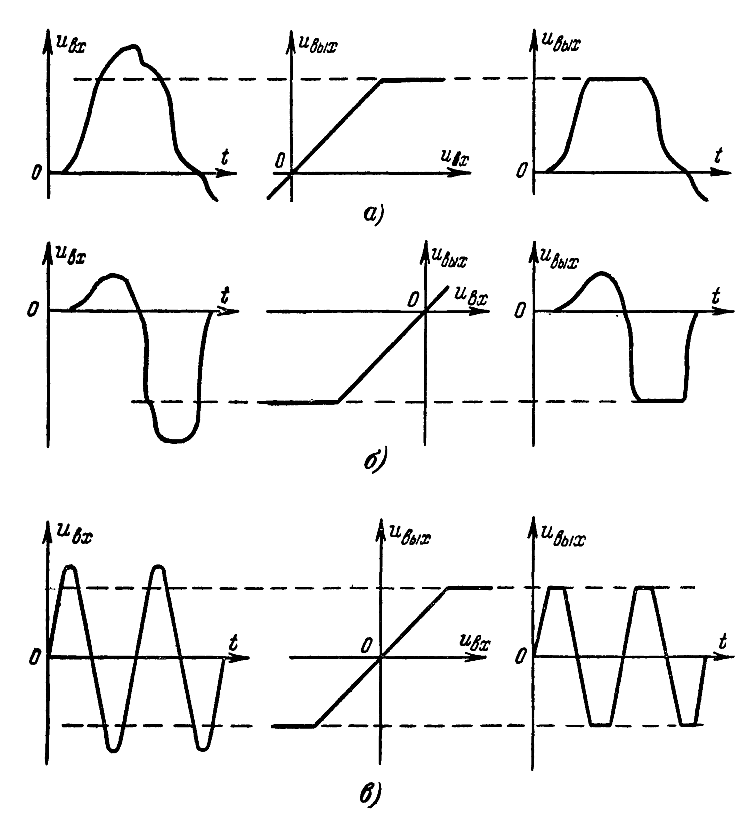


Рис. 19. Принцип работы ограничителя амплитуды.

а — ограничение по максимуму (сверху); *б* — ограничение по минимуму (снизу); *в* — двустороннее ограничение.

5. Диодное ограничение

На рис. 20 приведена так называемая последовательная схема диодного ограничителя. При положительном значении входного напряжения $u_{вх}$ диод открыт

(рис. 20, *а*), через него проходит ток. Напряжение $u_{вых}$ на выходе ограничителя пропорционально входному:

$$u_{вых} = \frac{R}{R_д + R} u_{вх},$$

где $R_д$ — сопротивление открытого диода.

Если сопротивление R выбрать много больше $R_д$, то можно считать, что напряжение $u_{вых}$ не отличается по величине от напряжения $u_{вх}$.

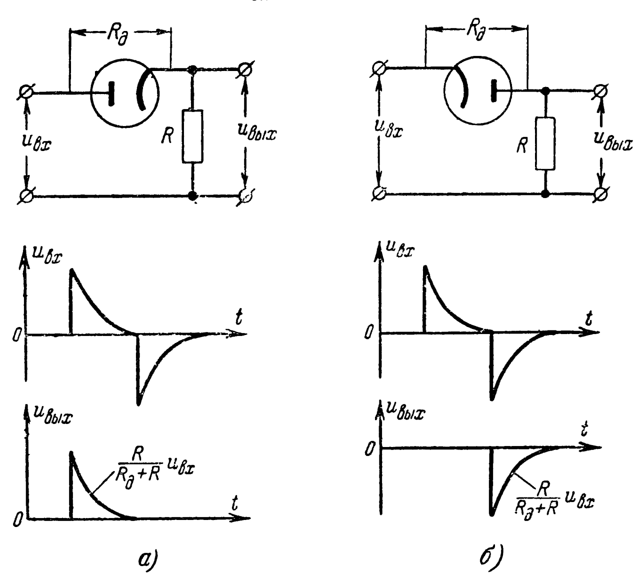


Рис. 20. Последовательный диодный ограничитель.
а — ограничитель по минимуму; *б* — ограничитель по максимуму.

При отрицательном значении напряжения $u_{вх}$ анод диода отрицателен по отношению к катоду. Диод при этом закрывается, ток через него прекращается, и поэтому напряжение на сопротивлении R равно нулю.

Таким образом, описываемая схема является диодным ограничителем по минимуму с нулевым уровнем ограничения. Если изменить полярность включения диода (рис. 20, *б*), то схема превратится в ограничитель по максимуму с нулевым уровнем ограничения.

Чтобы сделать уровень ограничения отличным от нуля, надо включить в схему источник постоянного напряжения

(рис. 21, *а*). При этом, если входное напряжение $u_{вх}$ будет отрицательно, но меньше (по абсолютной величине) величины постоянного напряжения E, диод все равно будет открыт, так как анод диода за счет смещения будет положителен относительно катода. Выходное напряжение повторит по форме входное, а по величине будет отличаться

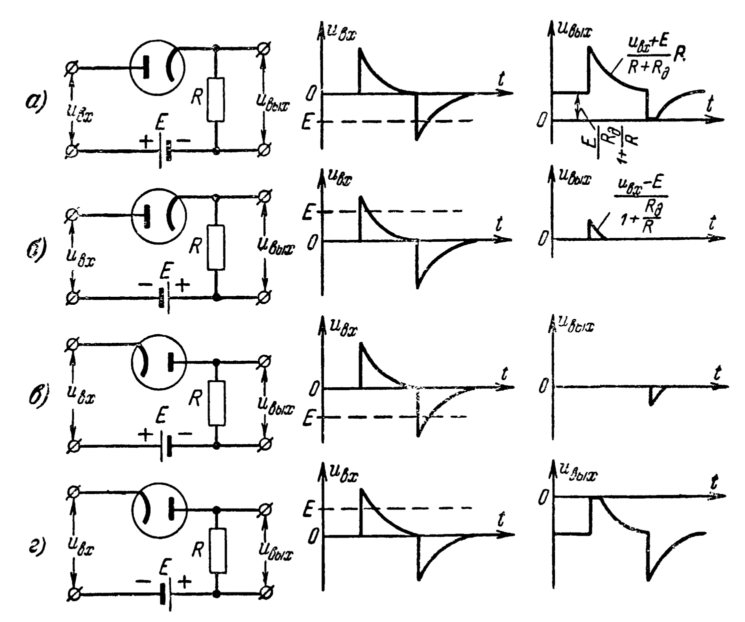


Рис. 21. Последовательный диодный ограничитель с уровнем ограничения E и параллельным включением источника смещающего напряжения.

а — ограничитель по минимуму с уровнем ограничения $+E$; *б* — то же с уровнем ограничения $-E$; *в* — ограничитель по максимуму с уровнем ограничения $+E$; *г* — то же с уровнем ограничения $-E$.

от него примерно на величину смещения E. Ограничение произойдет при достижении отрицательным входным напряжением (по абсолютной величине) величины смещения E. При этом ток диода прекратится, и выходное напряжение $u_{вых}$ будет равно нулю.

На рис. 21, *б*, *в* и *г* показана форма входного и выходного напряжений при отрицательном смещении, а также при положительном и отрицательном смещении при ограничении сверху.

Источник постоянного напряжения может быть включен

и последовательно с сопротивлением R, как показано на рис. 22.

На рис. 23, *а* представлена **параллельная** схема диодного ограничителя по максимуму. Будем считать, что сопротивление нагрузки много больше сопротивления R. Тогда при отрицательном значении входного напряжения

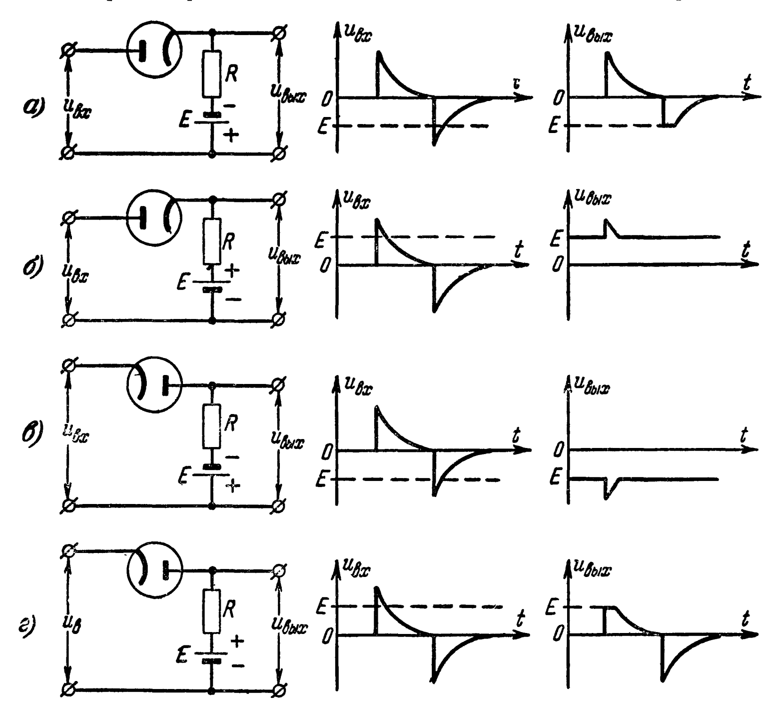


Рис. 22. Последовательный диодный ограничитель с уровнем ограничения E и последовательным включением источника смещающего напряжения.

а — ограничитель по минимуму с уровнем ограничения $+E$; *б* — то же с уровнем ограничения $-E$; *в* — ограничитель по максимуму с уровнем ограничения $+E$; *г* — то же с уровнем ограничения $-E$.

$u_{вх}$ диод будет заперт, и напряжение на выходе $u_{вых}$ не будет отличаться от входного, т. е. $u_{вых} = u_{вх}$.

При положительных значениях напряжения $u_{вх}$ диод открывается, и образуется потенциометр из сопротивлений R и $R_д$. Выходное напряжение $u_{вых}$ при этом будет:

$$u_{вых} = \frac{R_д}{R_д + R} u_{вх}.$$

Выбрав величину сопротивления R достаточно большой по сравнению с сопротивлением диода $R_д$, можно получить выходное напряжение, мало отличающееся от нуля.

Если изменить полярность включения диода (рис. 23, *б*), то схема превратится в параллельный ограничитель по минимуму с нулевым уровнем ограничения.

Так же как и в последовательной схеме, для изменения порога ограничения в схему включается источник постоянного напряжения E нужной величины и полярности (рис. 24).

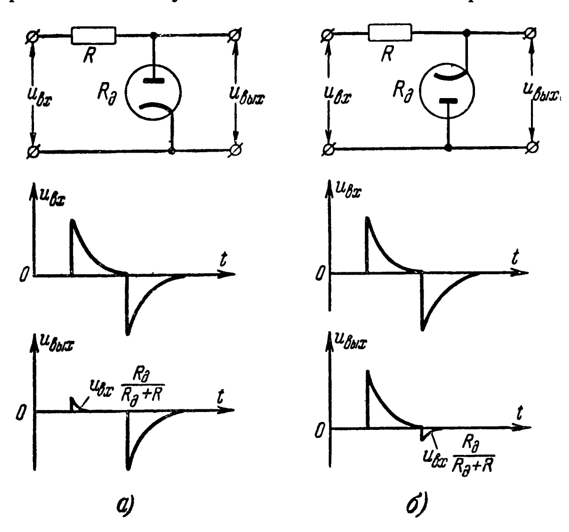


Рис. 23. Параллельный диодный ограничитель.
а — ограничитель по максимуму; *б* — ограничитель по минимуму.

Схема параллельного ограничителя не дает четкого ограничения. Действительно, полностью шунтировать выход (обеспечить $u_{вых}=0$) диод может только в случае, если его внутреннее сопротивление $R_д$ равно нулю. Так как обычно $R_д$ составляет сотни ом, то образуется потенциометр $R - R_д$, причем падение напряжения на сопротивлении $R_д$ является выходным напряжением ограничителя. Величина этого напряжения зависит от соотношения плеч потенциометра: чем больше R по сравнению с $R_д$, тем меньше это напряжение. Поэтому для получения четкого ограничения величину сопротивления R надо брать как можно больше. Однако, как будет видно из дальнейшего,

увеличению этого сопротивления препятствует возрастание влияния при этом паразитных емкостей.

На работу ограничителя влияет, кроме того, сопротивление его нагрузки. Если последнее не бесконечно велико, то во время, когда диод закрыт, по сопротивлению R и сопротивлению нагрузки проходит ток и часть входного на-

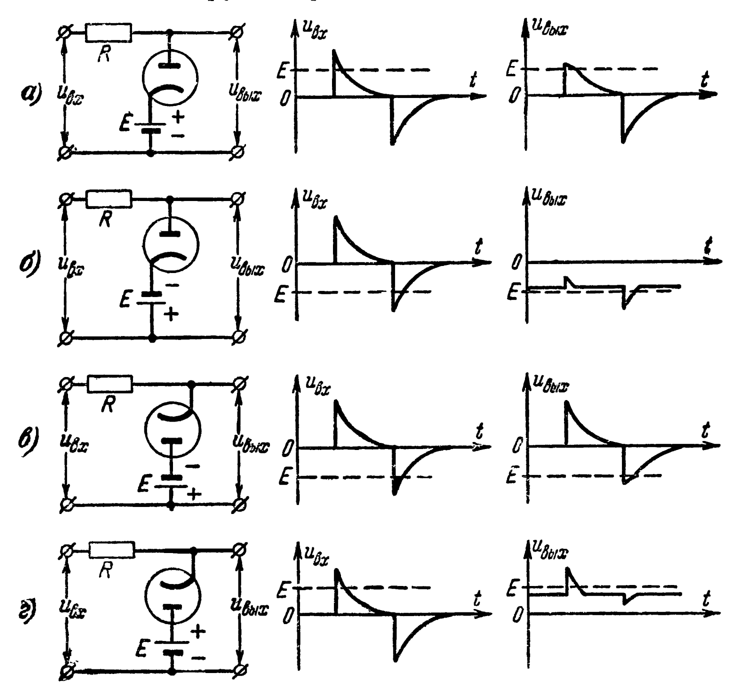


Рис. 24. Параллельный диодный ограничитель с уровнем ограничения E.
а — ограничитель по максимуму с уровнем ограничения $+E$; *б* — то же с уровнем ограничения $-E$; *в* — ограничитель по минимуму с уровнем ограничения $-E$; *г* — то же с уровнем ограничения $+E$.

пряжения падает на сопротивлении R. Это уменьшает величину выходного напряжения по сравнению с рассмотренным случаем, когда предполагалось, что сопротивление нагрузки бесконечно велико. Так как сопротивление нагрузки на практике не может быть бесконечно большим, то желательно выбирать величину сопротивления R как можно меньше.

Если соединить в одной схеме ограничитель по максимуму и ограничитель по минимуму, то схема будет работать как двусторонний ограничитель. Это сделано на

рис. 25,*а*, где представлена схема двустороннего параллельного диодного ограничителя. Предположим, что на вход подано синусоидальное напряжение. Пока напряжение на входе изменяется от нуля до величины, равной $+E_1$, оба диода заперты и напряжение на выходе равно напряжению на входе. Как только напряжение на входе

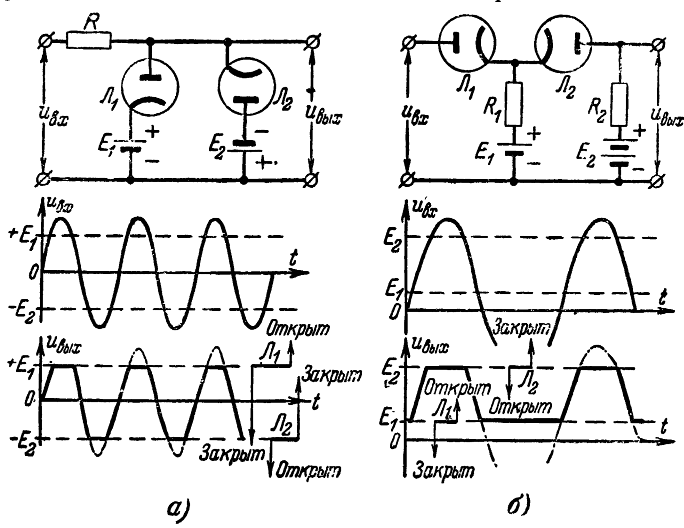


Рис. 25. Двусторонний диодный ограничитель.

а — соединение параллельных диодных ограничителей по максимуму и по минимуму; *б* — соединение последовательных диодных ограничителей по минимуму и по максимуму.

превысит напряжение $+E_1$, диод $Л_1$ откроется и произойдет ограничение сверху.

Когда напряжение на входе станет меньше напряжения $+E_1$, диод $Л_1$ опять закроется и напряжение на выходе вновь станет равным входному. Наконец, когда напряжение на входе станет меньше, чем $-E_1$, откроется диод $Л_2$ и произойдет ограничение снизу.

На рис. 25,*б* представлена схема двустороннего последовательного диодного ограничителя, составленного из последовательного ограничителя по минимуму и по максимуму.

До сих пор мы не учитывали влияния паразитных емкостей. Ограничение происходило мгновенно, как только входное напряжение достигало уровня ограничения. Однако в практических схемах всегда присутствует паразитная емкость $C_п$, состоящая из емкости монтажа и входной емко-

сти следующего за ограничителем устройства (рис. 26). Выясним, как влияет емкость C_n, на форму выходного напряжения.

Предположим, что на вход последовательного диодного ограничителя подано прямоугольное напряжение с практически нулевым временем нарастания и спада (нарастание и спад напряжения на выходе ограничетеля происходят скачками). Во время нарастания фронта входного импульса диод ограничителя откроется, и напряжение на выходе начнет возрастать экспоненциально с постоянной времени, определяемой сопротивлением параллельных ветвей $R_д$ и R и паразитной емкостью C_n, т. е.

$$\tau_ф = \frac{R_д R}{R_д + R} C_n \approx R_д C_n.$$

Спадание выходного напряжения ограничителя происходит медленнее, чем соответствующее нарастание, так как теперь постоянная времени определяется паразитной емкостью C_n и только сопротивлением R (ибо диод закрыт):

$$\tau_c = RC_n.$$

Таким образом, длительность спада тем больше, чем больше сопротивление R. Поэтому это сопротивление в последовательной схеме диодного ограничителя выбирается из условия

$$R \leqslant \frac{t_c}{3C_n},$$

где t_c — допустимая длительность спада выходного импульса.

В параллельной схеме диодного ограничителя (рис. 27) паразитная емкость C_n складывается из емкости монтажа и входной емкости следующего за ограничителем каскада. Поэтому при отрицательном перепаде входного прямоугольного напряжения начинается заряд емкости C_n, и нарастание выходного напряжения происходит по экспоненте с постоянной времени RC_n.

Во время положительного перепада входного напряжения, пока диод закрыт, напряжение на емкости C_n, а следовательно, и на выходе начинает изменяться по экспоненте с той же постоянной времени $R\,C_n$. Однако, как только напряжение на входе станет положительным, диод откроется, и емкость C_n быстро разрядится на сопротивление диода $R_д$. Поэтому в параллельной схеме диодного

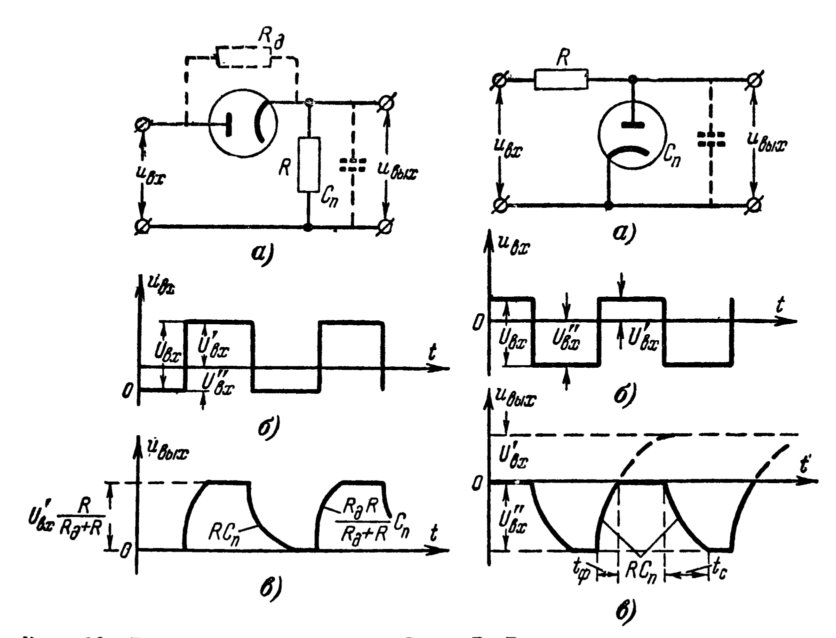


Рис. 26. Влияние паразитной емкости на форму выходного напряжения в схеме последовательного диодного ограничителя.

а — схема; *б* — форма входного напряжения; *в* — форма выходного напряжения.

Рис. 27. Влияние паразитной емкости на форму выходного напряжения в схеме параллельного диодного ограничителя.

а — схема; *б* — форма входного напряжения; *в* — форма выходного напряжения.

ограничителя время нарастания выходного импульса меньше времени спада:

$$t_c = 3RC_п, \quad \text{а} \quad t_ф = 0{,}7RC_п,$$

где $t_ф$ и t_c — длительность нарастания и спада импульса.

Вспомним, что для четкой работы параллельного диодного ограничителя величину сопротивления R надо выбирать как можно большей. В то же время для уменьшения длительности фронта и спада выходного напряжения величина сопротивления R должна быть небольшой. В этом противоречии заключается важный недостаток схемы параллельного диодного ограничителя.

6. Анодно-сеточное ограничение

Схема **сеточного ограничителя** представлена на рис. 28. Она напоминает уже знакомую схему параллельного диодного ограничителя по максимуму (сверху),

причем роль диода играет участок сетка — катод. Однако эта схема одновременно и усиливает входное напряжение. Кроме триодов, для ограничения могут применяться и многоэлектродные лампы.

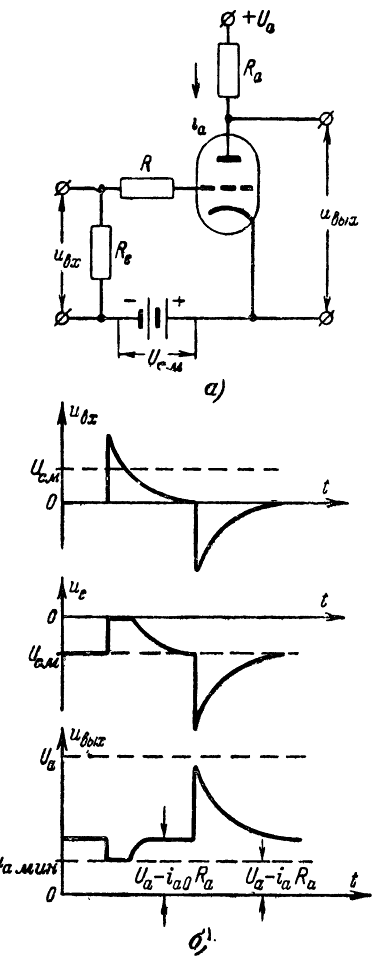


Рис. 28. Сеточный ограничитель.
а — схема; *б* — диаграммы напряжений.

Отличие сеточного ограничителя от диодного заключается еще и в том, что сопротивление участка сетка—катод значительно больше сопротивления открытого диода. Поэтому для получения такого же по четкости ограничения, как при диодной схеме, приходится увеличивать сопротивление R, вследствие чего большую роль играют паразитные емкости.

Изменение уровня ограничения происходит так же, как и в схемах диодного ограничения. Для этого при помощи потенциометра или путем включения батареи на сетке лампы создается нужное смещение.

На рис. 28,*б* приведены диаграммы напряжений на различных участках схемы. Из них видно, что минимальное значение выходного напряжения определяется величиной анодного тока при нулевом напряжении на сетке:

$$u_{вых.мин} = u_{а.мин} = U_a - i_a R_a.$$

Сеточный ограничитель сверху может стать двусторонним, если путем соответствующего смещения на сетке добиться того, чтобы при определенном отрицательном значении входного напряжения лампа запиралась (ограничение по минимуму), а при положительном происходило ограничение по максимуму за счет появления сеточного тока.

Анодное ограничение по минимуму (снизу) может наступить и в обычной усилительной схеме. Если входное напряжение на сетке лампы станет меньше потенциала запирания U_{c0}, то лампа закроется, анодный ток упадет до нуля, и напряжение на аноде будет равно анодному напряжению питания U_a. Поэтому выходное напряжение схемы повторяет входное только выше уровня ограничения U_{c0}. В схемах анодного ограничителя снизу могут работать только лампы с резкой отсечкой анодного тока, на-

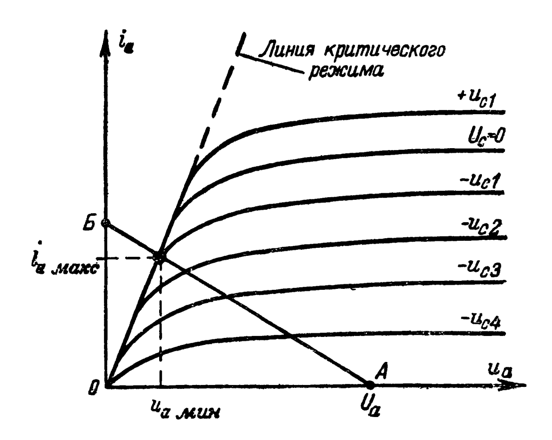


Рис. 29. Анодные характеристики пентода.
АБ — нагрузочная прямая.

пример 6Ж4, 6Ж7, 6П9. Лампы с удлиненной характеристикой, такие как 6К7, для этой цели непригодны.

Перейдем теперь к рассмотрению анодного ограничения сверху. На рис. 29 представлены анодные характеристики пентода и нанесена нагрузочная прямая *АБ*. При малых значениях анодного напряжения характеристики сливаются в одну линию, носящую название линии критического режима. Предположим, что напряжение на сетке лампы принимает последовательно значения $-u_{c4}$, $-u_{c3}$, $-u_{c2}$ и т. д. При этом рабочая точка передвигается вдоль нагрузочной прямой, изменяются величина анодного тока i_a и напряжение u_a на аноде лампы. Наконец, при напряжении $-u_{c1}$ на сетке лампы рабочая точка попадет на линию критического режима. Теперь при изменении сеточного напряжения U_{c0}, $+u_{c1}$ и т. д. рабочая точка передвигаться

не будет, поэтому анодный ток и напряжение на аноде лампы будут неизменными, т. е., несмотря на дальнейшее увеличение входного напряжения U_c, выходное напряжение останется равным $u_{а.мин}$ — происходит анодное ограничение сверху (по максимуму). При этом уровнем ограничения является значение $-u_{c1}$ напряжения на сетке лампы.

Напряжение $u_{а.мин}$ будет тем меньше, чем больше сопротивление нагрузки; одновременно увеличивается и четкость ограничения. Однако при этом возрастает влияние паразитных емкостей.

Анодный ограничитель сверху можно использовать и для двустороннего ограничения, соответствующим образом выбрав начальную рабочую точку и амплитуду входного напряжения. Ограничение снизу будет происходить за счет запирания лампы большим отрицательным напряжением на сетке, а ограничение сверху — за счет достижения рабочей точкой линии критического режима.

Рассмотрим влияние паразитных емкостей на форму выходного напряжения. Как и раньше, будем считать, что на вход ограничителя подаются прямоугольные импульсы с очень малым временем нарастания и спада.

На рис. 30, *а* приведена схема сеточного ограничителя на пентоде. Здесь паразитная емкость $C_п$ образована выходной межэлектродной емкостью лампы и входной емкостью следующего за ограничителем устройства. Когда входное напряжение превышает потенциал запирания, лампа открывается, напряжение на ее аноде уменьшается и емкость $C_п$, заряженная до напряжения U_a, бывшего на аноде закрытой лампы, начинает разряжаться. Так как у пентодов $R_i \gg R_a$, то с влиянием внутреннего сопротивления лампы можно не считаться, выходное напряжение убывает со скоростью, определяемой постоянной времени $R_a C_п$. Когда входное напряжение вновь становится отрицательным, анодный ток лампы уменьшается, а напряжение на ее аноде увеличивается. Емкость $C_п$ при этом начинает заряжаться через сопротивление R_a, и выходное напряжение нарастает с прежней скоростью (рис. 30, *в*). Таким образом в пентодном ограничителе длительность нарастания и спада выходного импульса одинакова и равна $3R_a C_п$. А так как

$$R_a = \frac{U_a - u_{а.мин}}{i_{a0}}, \text{ то } t_{ф.с} = \frac{(U_a - u_{а.мин})\,C_п}{i_{a0}},$$

где $U_a - u_{а.мин}$ — амплитуда выходного напряжения, т. е. изменение напряжения на аноде лампы при пересечении нагрузочной линии с характеристикой для $u_c = 0$ (рис. 30, *г*);

$i_{а0}$ — анодный ток лампы при $u_c = 0$.

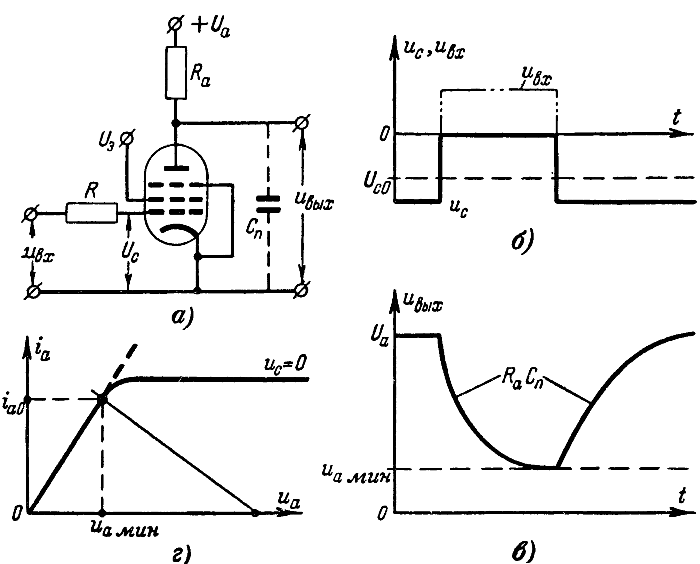


Рис. 30. Влияние паразитной емкости на форму выходного напряжения сеточного ограничителя.

а — схема сеточного ограничителя на пентоде; *б* — форма входного напряжения и напряжения на управляющей сетке лампы; *в* — форма выходного напряжения; *г* — анодная характеристика пентода $u_c = 0$.

Иногда напряжение на ограничитель приходится подавать через разделительный конденсатор *C* (рис. 31). Это необходимо, например, для отделения от ограничителя цепи источника анодного напряжения предшествующего усилителя. В процессе работы ограничителя происходит дополнительный заряд конденсатора и возникает смещение, изменяющее уровень ограничения. Заряд конденсатора происходит даже при симметричном входном напряжении, потому что цепи заряда и разряда конденсатора имеют неодинаковое сопротивление.

Для ограничителя по схеме рис. 31,*а* сопротивление цепи заряда меньше, чем разряда. Когда входное напряжение положительно, ток заряда конденсатора протекает

по двум параллельным ветвям: r и $R - R_\partial$ (диод открыт). Во время разряда конденсатора диод заперт, и ток разряда протекает только через сопротивление r. Это дополнительное смещение уровня ограничения за счет заряда конденсатора напряжением U_0 необходимо учитывать. Иногда для компенсации этого напряжения приходится подавать специальное смещающее напряжение от постороннего источника.

Уменьшение влияния переходного конденсатора может быть достигнуто путем уменьшения отношения сопротивле-

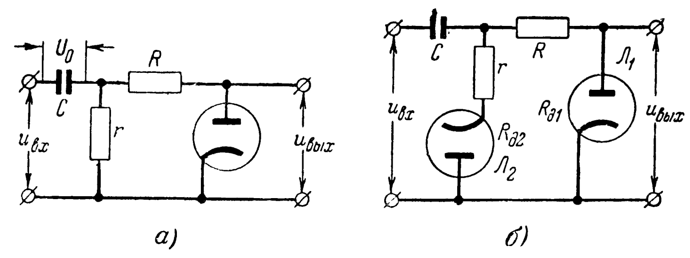


Рис. 31. Схемы ограничителей с разделительным конденсатором.
а — схема, иллюстрирующая влияние смещения на разделительном конденсаторе на работу ограничителя; б — схема для устранения дополнительного смещения.

ний r/R. Однако здесь мы сталкиваемся с прежними трудностями: увеличение R связано с усилением влияния паразитных емкостей, а уменьшение r влечет за собой увеличение потребной мощности источника входного напряжения.

Заряд переходного конденсатора можно устранить, если сделать сопротивления цепей заряда и разряда одинаковыми. Для этого в схеме на рис. 31,б последовательно с сопротивлением r включают диод $Л_2$. При положительном напряжении на входе диод $Л_2$ заперт, и заряд конденсатора происходит по цепи R и $R_{\partial 1}$. При отрицательном входном напряжении диод $Л_1$ закрывается, а диод $Л_2$ открывается, и разряд происходит по цепи r и $R_{\partial 2}$. Подбором величины сопротивления r можно сделать сопротивления цепей $R + R_{\partial 1}$ и $r + R_{\partial 2}$ равными между собой и тем самым исключить постоянный заряд на конденсаторе.

7. Фиксаторы уровня

Напряжение U_0 на переходном конденсаторе в схеме ограничителя не всегда оказывается вредным. Оно может быть использовано для поддержания выходного напряже-

ния на определенном уровне. Такие устройства носят название фиксаторов уровня и отличаются от ограничителей отсутствием сопротивления R (рис. 32).

Схема работает следующим образом. Так как сопротивление r много больше сопротивления $R_д$ открытого диода, то конденсатор, заряжаясь в моменты, когда диод открыт, до пикового значения входного напряжения, не успевает заметно разрядиться в промежутках между импульсами на очень большое сопротивление r (десятки мегом). Поэтому выходное напряжение $u_{вых}$ сдвинуто относительно входного на величину напряжения на конденсаторе $U_0 = U_{пик}$ и зафиксировано на этом уровне.

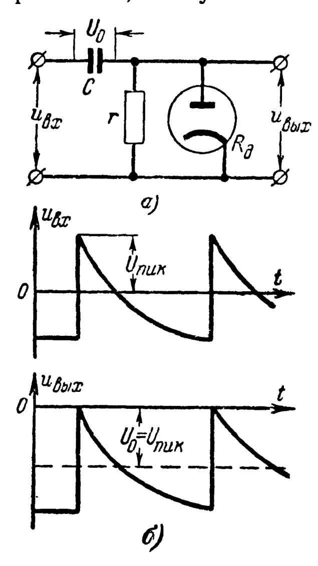


Рис. 32. Фиксатор уровня.
а — схема; *б* — форма входного и выходного напряжений.

Фиксаторы уровня часто используются в радиотехнических устройствах, в частности в телевидении, где они «восстанавливают» постоянную составляющую сигналов изображения. Здесь постоянную составляющую нельзя восстановить или зафиксировать при помощи источника постоянного напряжения, так как в процессе передачи она изменяется в зависимости от характера передаваемых сцен. Поэтому необходимо устройство, которое автоматически поддерживало бы нужный уровень смещения на сетке оконечной лампы видеоусилителя или на сетке трубки.

Схема такого устройства приведена на рис. 33. На ее вход поступает телевизионный сигнал отрицательной полярности. При этом диод открыт, и конденсатор быстро заряжается через него до пикового значения бланкирующих импульсов. Когда бланкирующий импульс кончается, диод закрывается, и происходит медленный разряд конденсатора через сопротивление R_2. Однако он не успевает заметно разрядиться до прихода следующего бланкирующего импульса. На выходе схемы образуется напряжение, складывающееся из входного напряжения и напряжения на конденсаторе, которое определяет величину смещения

на сетке лампы видеоусилителя. При изменении освещенности передаваемой сцены изменяется уровень бланкирующих импульсов, поступающих на вход устройства, по

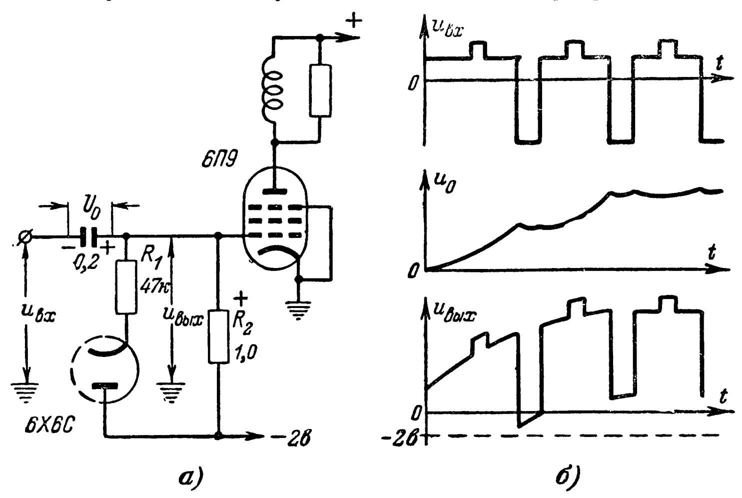


Рис. 33. „Восстановление" постоянной составляющей в телевидении. *а* — принципиальная схема; *б* — форма входного и выходного напряжений и напряжения U_0 на конденсаторе.

этому изменяется и величина напряжения U_0, до которой заряжается конденсатор, а следовательно, изменяется и уровень постоянной составляющей.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПОЛУЧЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

8. Спусковые устройства

Спусковые устройства используются для самых разнообразных целей, в частности для получения напряжения прямоугольной формы.

Чтобы понять, как работает спусковое устройство, обратимся к схеме простейшего двухкаскадного реостатного усилителя без переходных конденсаторов между каскадами (рис. 34,*а*).

Изобразим зависимость выходного напряжения $u_{вых}$ от входного $u_{вх}$. При большом отрицательном напряжении $u_{вх}$

(участок *АБ* на рис. 34,*б*) лампа $Л_1$ заперта и напряжение на ее аноде равно напряжению источника питания U_a. Напряжение на сетке лампы $Л_2$ превышает отрицательное напряжение смещения, и эта лампа открыта. Напряжение на ее аноде минимально и определяется разностью $U_a - i_{a2}R_{a2}$. Когда нарастающее напряжение $u_{вх}$ достигнет потенциала отпирания лампы $Л_1$ (точка *Б*), лампа откроется. При этом напряжение на ее аноде уменьшится,

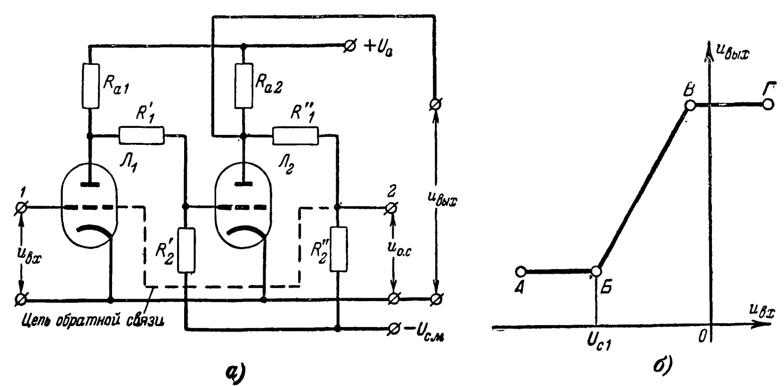


Рис. 34. Двухкаскадный реостатный усилитель.
а — схема; *б* — характеристика усилителя.

что вызовет уменьшение положительного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и увеличение напряжения на ее аноде; выходное напряжение $u_{вых}$ при этом также увеличится (участок *БВ*). Наконец напряжение на аноде лампы $Л_1$, а следовательно, и на сетке лампы $Л_2$ уменьшится настолько, что лампа $Л_2$ закроется (*В* — точка запирания лампы $Л_2$). Теперь увеличение входного напряжения $u_{вх}$ на сетке лампы $Л_1$ уже не будет влиять на напряжение на аноде лампы $Л_2$, а значит и на выходное напряжение $u_{вых}$ (участок *ВГ*).

Соединим точку *2* схемы с сеткой лампы $Л_1$, т. е. введем положительную обратную связь. Теперь при увеличении входного напряжения описанный выше процесс отпирания лампы $Л_1$ и запирания лампы $Л_2$ произойдет чрезвычайно быстро. Действительно, увеличение входного напряжения (после точки *Б* характеристики) приведет к уменьшению напряжения на аноде лампы $Л_1$ и, следовательно к увеличению напряжения на аноде лампы $Л_2$, т. е.

к дополнительному уменьшению отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_1$. Это, в свою очередь, вызывает дальнейшее уменьшение напряжения на аноде лампы $Л_1$ и увеличение напряжения на аноде лампы $Л_2$ и т. д. Возникает как бы цепная реакция, в результате которой схема переходит в новое состояние, при котором лампа $Л_1$ открывается, а лампа $Л_2$ закрывается.

Однако цепная реакция возникает в схеме не при любых условиях. Рассмотрим состояния, в которых находится спусковое устройство в процессе работы.

В первом из них лампа $Л_1$ закрыта, а лампа $Л_2$ открыта. В таком состоянии устройство находится в выбранном нами исходном положении. Оно будет устойчивым, так как при отсутствии входного напряжения устройство может находиться в нем сколько угодно долго.

Устройство может находиться и в другом устойчивом состоянии, в котором лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта. Оно может быть выведено из этого состояния, например, подачей на сетку лампы $Л_1$ отрицательного входного или, лучше сказать, запускающего напряжения.

Наконец, возможно третье состояние, в котором устройство находится в момент перехода из одного устойчивого состояния в другое. В этом состоянии обе лампы открыты, и такое состояние н е у с т о й ч и в о.

Какая разница между этими состояниями с точки зрения изменения напряжений и токов в цепях схемы?

Устойчивое состояние должно быть таким, чтобы любые случайные изменения токов и напряжений в схеме не могли вывести устройство из этого состояния. В реальной схеме случайные изменения токов и напряжений всегда существуют из-за флуктуационных процессов, изменения питающего напряжения и т. д. Устройство останется в устойчивом состоянии только при том условии, что эти изменения не повлекут за собой еще больших изменений токов и напряжений в схеме. Предположим, что напряжение на сетке лампы $Л_1$ по каким-то случайным причинам изменилось. Это вызовет изменение выходного напряжения, а значит, и напряжения обратной связи $u_{о.с}$, подаваемой на сетку лампы $Л_1$. Это изменение может быть либо больше изменения напряжения на сетке лампы $Л_1$, которое его вызвало, либо меньше его в зависимости от общего коэффициента усиления K (от входа до выхода цепи обратной связи). Если $K > 1$, то система будет неустойчивой: случайный процесс будет развиваться, нарастая лавинооб-

разно. Если же $K < 1$, то система будет устойчивой: случайный процесс затухает.

В практических схемах, когда обе лампы находятся в открытом состоянии, коэффициент $K \gg 1$. Это приводит к резким (скачкообразным) переходам из одного равновесного состояния в другое, как только одна из ламп будет открыта каким-либо внешним сигналом.

Предположим, что лампа $Л_1$ заперта, а лампа $Л_2$ открыта (точка *А* на рис. 35). Чтобы перевести устройство из этого устойчивого состояния в другое устойчивое состояние, надо на сетку лампы $Л_1$ подать запускающий положительный импульс $u_{зап}$ такой величины, чтобы напряжение на сетке лампы стало меньше потенциала запирания. При достижении такого положения (точка *Б*) устройство скачком перейдет в новое устойчивое состояние (точка *б*), характеризуемое верхней ветвью *ВГ* характеристики.

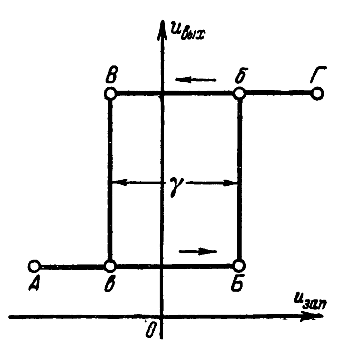


Рис. 35. Характеристика апериодического усилителя с положительной обратной связью.

Чтобы теперь вернуть устройство в нижнее устойчивое состояние, характеризуемое ветвью *АБ*, надо на сетку лампы $Л_1$ подать отрицательный импульс, после чего устройство скачком перейдет в точку *в* характеристики. Однако для этого вовсе нет необходимости, чтобы отрицательный запускающий импульс имел амплитуду, равную потенциалу запирания лампы, так как даже небольшое уменьшение напряжения на сетке этой лампы приведет к значительному увеличению напряжения на ее аноде, а значит, и к увеличению напряжения на сетке лампы $Л_2$, в результате чего эта лампа откроется, разовьется цепная реакция и устройство «опрокинется» в прежнее устойчивое состояние (отрицательный запускающий импульс может быть в 2—3 раза меньше $u_{с.0}$). Таким образом, к отрицательным запускающим импульсам устройство более чувствительно.

Из рис. 35 видно, что при непрерывном изменении запускающего напряжения выходное напряжение изменяется скачками. Скачки происходят при прохождении запускающим напряжением пороговых значений, определяемых крайними точками *Б* и *В* характеристики. Расстояние

между этими точками обозначается буквой γ и носит название напряжения гистерезиса. Напряжение гистерезиса зависит от коэффициента усиления и тем больше, чем больше коэффициент усиления.

При помощи рассмотренного спускового устройства можно, например, превратить синусоидальное напряжение в прямоугольное, как это показано на рис. 36, *а*. Здесь

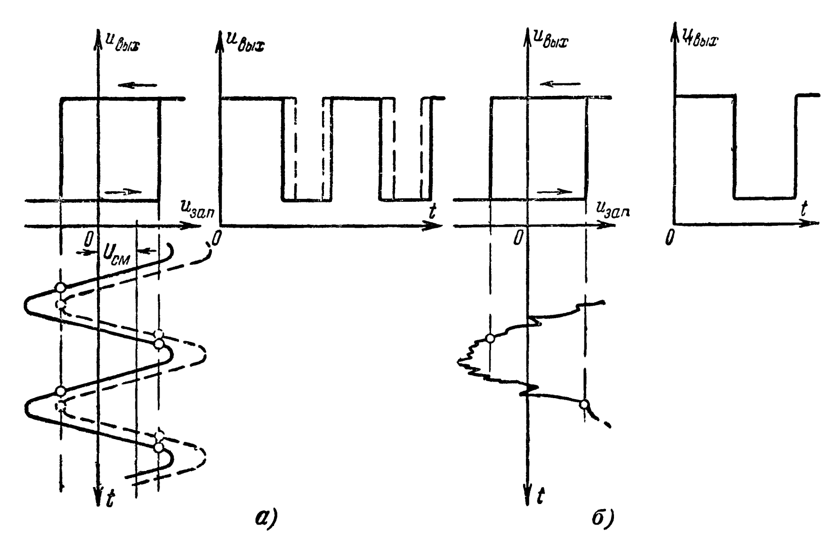


Рис. 36. Применение спускового устройства для формирования прямоугольных импульсов из синусоидального напряжения (*а*) и „восстановление" импульса (*б*).

видно, что путем изменения напряжения смещения $U_{см}$ можно изменять коэффициент заполнения выходных импульсов.

На рис. 36,*б* показано восстановление прямоугольной формы импульса при помощи спускового устройства. Такое восстановление необходимо, например, при приеме импульсно-модулированных сигналов, когда подача на демодулятор искаженных помехами импульсов приводит к искажению передачи.

Практическая схема спускового устройства с анодно-сеточными связями приведена на рис. 37. После подачи напряжения питания устройство переходит в состояние, при котором одна из ламп открыта (например, $Л_2$), а другая закрыта.

В таком положении устройство останется сколько угодно долго. Если теперь на сетку лампы $Л_1$ подать положительный импульс, то после достижения потенциала отпирания лампы напряжение на аноде лампы $Л_1$ начнет уменьшаться. Уменьшится напряжение и на сетке лампы $Л_2$, а напряжение на ее аноде увеличится. Через цепь R_1—R_2 увеличивающееся напряжение с анода этой лампы по-

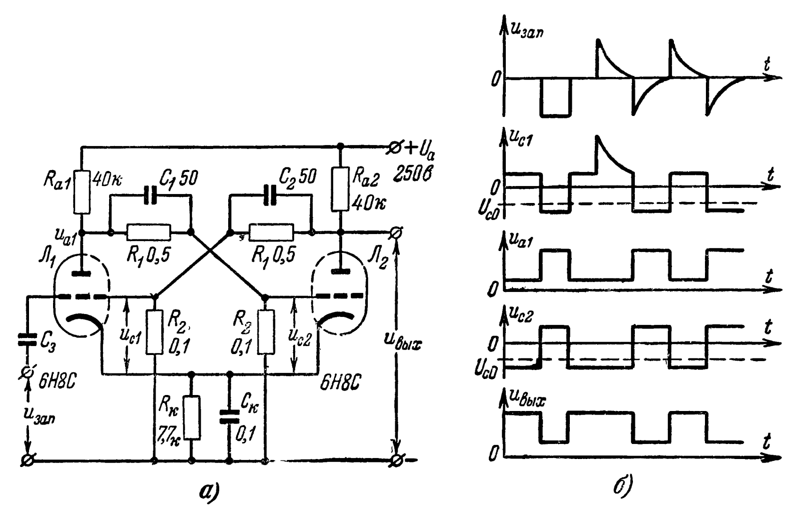


Рис. 37. Спусковое устройство с анодно-сеточными связями.
а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

ступит на сетку лампы $Л_1$ и т. д., т. е. начнется лавинообразный процесс и устройство перейдет в другое состояние, когда лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта. Оно будет сохраняться до прихода следующего, теперь уже отрицательного, запускающего импульса, который закроет лампу $Л_1$, переведя схему в исходное состояние.

Отрицательное смещение на сетках ламп в рассматриваемой схеме создается за счет прохождения анодных токов ламп через сопротивление $R_к$. Так как сумма токов ламп в процессе работы устройства практически остается постоянной (она незначительно меняется лишь в момент опрокидывания схемы), то емкость конденсатора $C_к$ может быть небольшой. Конденсаторы C_1 и C_2 (порядка 15—150 *пф*) сокращают время перехода из одного состояния в другое. В момент опрокидывания резкие скачки напряжения на анодах ламп будут почти полностью переда-

ваться на сетки через емкостные делители, образуемые конденсатором C_1 (или C_2) и входной емкостью лампы, так как для импульсного напряжения сопротивление этих емкостных делителей значительно меньше, чем делителей $R_1 - R_2$.

Запускающее напряжение $u_{зап}$ подается на сетку лампы $Л_1$ через конденсатор $C_з$, который через внутреннее сопротивление источника этого напряжения оказывается подключенным параллельно входной емкости лампы. Чтобы не увеличивать длительность опрокидывания устройства, емкость этого конденсатора должна быть малой (10—30 *пф*). Желательно, чтобы запускающее напряжение имело вид коротких остроконечных импульсов. При прямоугольной форме сигнала запуска возможно обратное срабатывание спускового устройства от второго перепада управляющего напряжения, дифференцированного в сеточной цепи лампы $Л_1$.

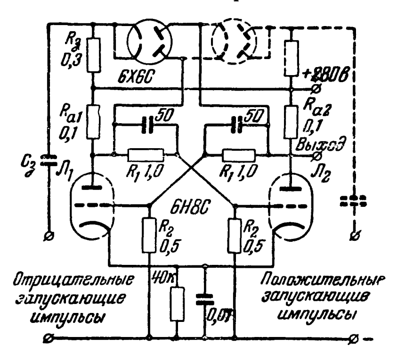


Рис. 38. Запуск спускового устройства через разделительные диоды.

Управляющие импульсы в обычных условиях выбираются не короче 1—2 *мксек*, иначе напряжение обратной связи не успеет вырасти настолько, чтобы после окончания действия управляющего импульса поддерживался режим перехода из одного состояния в другое, и опрокидывания не произойдет.

Если спусковое устройство должно срабатывать от импульсов одинаковой полярности, то они подаются через конденсаторы одновременно на сетки или аноды обеих ламп. В этом случае их лучше подавать через разделительные диоды (рис. 38). При отсутствии управляющих импульсов падения напряжения на сопротивлении $R_з$ не происходит, и оба диода заперты вследствие того, что их катоды находятся под положительным потенциалом относительно анодов (из-за падения напряжения на сопротивлениях R_{a1} и R_{a2}). В момент подачи отрицательного управляющего импульса диод, анод которого присоединен к аноду открытой лампы, остается запертым. Второй же диод открывается, и на анод запертой лампы подается от-

рицательный управляющий импульс. Затем через делитель $R_1 — R_2$ он поступает на сетку открытой лампы и вызывает опрокидывание схемы.

Эти же рассуждения справедливы и для положительных управляющих импульсов, но в этом случае необходимо изменить полярность включения диодов. При отсутствии управляющих импульсов через диод, катод которого присоединен к аноду открытой лампы, проходит ток. При этом на сопротивлении $R_з$ создается падение напряжения, и анод второго диода, катод которого присоединен к аноду закрытой лампы, оказывается под отрицательным потенциалом по отношению к катоду (диод заперт). Поэтому положительный управляющий импульс может пройти только через открытый диод на анод открытой лампы, а оттуда через цепь $R_1 — R_2$ на сетку закрытой лампы и вызвать опрокидывание устройства.

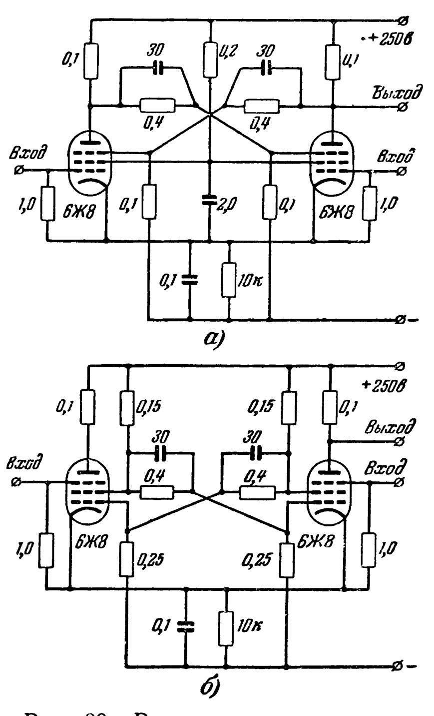


Рис. 39. Разновидности спусковых устройств на пентодах.

а — схема с обратной связью на защитные сетки; *б* — схема со связью между управляющими и экранирующими сетками.

Запуск спускового устройства через разделительные диоды обладает еще тем преимуществом, что конденсатор $C_з$ оказывается подключенным к лампам спускового устройства только в начале опрокидывания, так как скорость нарастания напряжения на аноде лампы, к которой подключен проводящий диод, обычно больше скорости нарастания управляющего напряжения и диод в самом начале опрокидывания оказывается закрытым. Этим достигается развязка цепей запуска от спускового устройства.

В схемах спусковых устройств могут быть использованы и многосеточные лампы. На рис. 39,*а* приведена схе-

ма, где цепь управления отделена от цепи обратной связи и тем самым исключено влияние цепи управления на процесс опрокидывания.

На рис. 39,*б* приведена схема, где в качестве анодов в схеме спускового устройства используются экранирующие сетки пентодов. Выходное напряжение снимается с анодов ламп. Этим исключается влияние цепи, к которой присоединено спусковое устройство, на его работу.

Рассмотрим схему спускового устройства с катодной связью (рис. 40). Предположим, что лампа $Л_2$ открыта. Ее анодный ток проходит по катодному сопротивлению $R_к$, образуя на нем падение напряжения (положительное относительно катода лампы $Л_1$), величина которого превышает потенциал запирания этой лампы. Напряжение на сетке лампы $Л_2$ при этом положительно, так как напряжение на аноде закрытой лампы $Л_1$ равно напряжению источника анодного питания. Такое состояние устройства устойчиво.

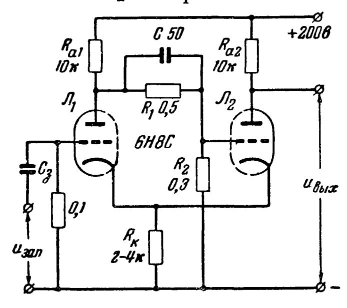


Рис. 40. Спусковое устройство с катодной связью.

Если теперь на сетку лампы $Л_1$ подать положительный запускающий импульс такой амплитуды, что напряжение на сетке станет больше потенциала запирания, то через лампу $Л_1$ потечет ток. Напряжение на ее аноде при этом уменьшится, а, следовательно, уменьшится и напряжение на сетке лампы $Л_2$. Это приведет к тому, что ток через эту лампу уменьшится и падение напряжения на катодном сопротивлении $R_к$ от тока лампы $Л_2$ также уменьшится.

Таким образом, на катодном сопротивлении $R_к$ действуют напряжения двух обратных связей — отрицательной и положительной.

Напряжение отрицательной обратной связи образуется за счет прохождения через сопротивление тока лампы $Л_1$. При увеличении этого тока смещение на катоде лампы $Л_1$ увеличивается.

Положительная обратная связь образуется за счет прохождения через сопротивление тока лампы $Л_2$, и ее действие приводит к уменьшению смещения на катоде лампы $Л_1$. Если положительная обратная связь больше отри-

цательной, т. е. уменьшение смещения на катоде лампы $Л_1$ от действия положительной обратной связи не только компенсирует увеличение этого смещения от действия отрицательной обратной связи, но и вызывает еще большее уменьшение смещения, то развивается цепная реакция. При этом смещение на катоде лампы $Л_1$ резко падает, анодный ток ее увеличивается, что приводит к резкому падению напряжения на сетке лампы $Л_2$. Наконец оно становится ниже потенциала запирания лампы $Л_2$, и лампа запирается, т. е. устройство скачком переходит в новое устойчивое состояние, в котором лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта.

Для возвращения устройства в прежнее устойчивое состояние на сетку лампы $Л_1$ надо подать отрицательный импульс. Амплитуда его должна быть такова, чтобы вызванное им уменьшение анодного тока лампы $Л_1$ привело к такому увеличению напряжения на сетке лампы $Л_2$, в результате которого лампа $Л_2$ откроется и создадутся условия для развития цепной реакции.

Конденсатор C, шунтирующий сопротивление R_1, служит для ускорения опрокидывания.

Выходное напряжение может сниматься как с анода, так и с катода лампы $Л_2$. В последнем случае цепь выхода отделена от цепи обратной связи и не влияет на скорость опрокидывания.

До сих пор мы не учитывали влияния паразитных емкостей в схемах спусковых устройств и считали, что устройство переходит из одного состояния в другое мгновенно, как только коэффициент усиления ее становится больше единицы. В реальных условиях это невозможно. Устройство переходит из одного устойчивого состояния в другое в течение какого-то, хотя и малого, но конечного промежутка времени, потребного для перезаряда паразитных емкостей, называемого *длительностью опрокидывания*. Скорость опрокидывания определяет крутизну нарастания и спада выходного напряжения, т. е. степень приближения выходного напряжения к прямоугольной форме. В хороших спусковых устройствах длительность опрокидывания не превышает десятых и сотых долей микросекунды.

Для получения малого времени опрокидывания электронные лампы устройства должны обладать большой крутизной характеристики. Это обеспечит большой коэффициент усиления устройства, а значит, и интенсивное развитие цепной реакции. Кроме этого, межэлектродные ем-

кости лампы (паразитные емкости схемы) должны быть возможно меньшими. Желательно также, чтобы лампы имели небольшой потенциал запирания U_{c0}. Наиболее подходящими типами ламп являются пентоды 6Ж1П, 6Ж4, и 6П9. Если от устройства не требуется очень большая скорость опрокидывания, то целесообразно применять триоды 6Н8С, 6Н9С и 6Н15П.

Приведем соображения по выбору величин и элементов схем спусковых устройств.

Время нарастания выходного напряжения определяется постоянной времени выходной цепи, состоящей из сопротивления R_{a2} анодной нагрузки выходной лампы и паразитной емкости C_n, в которую входит емкость внешней цепи, подключаемой к выходу спускового устройства, выходная емкость лампы $Л_2$ и емкость монтажа. Длительность фронта выходного напряжения определяется по формуле

$$t_ф = 3R_{a2}C_n.$$

Чтобы уменьшить длительность фронта выходного импульса, надо уменьшить R_{a2} и C_n. Уменьшать C_n можно за счет рационального монтажа, выбора ламп с малой выходной емкостью и т. д. Уменьшение величины сопротивления R_{a2} приводит к снижению амплитуды выходного напряжения и к уменьшению коэффициента усиления, что влечет за собой рост времени опрокидывания устройства. Поэтому желательно применять лампу с большим током (например, 6П9 или 6П3С). В этом случае при малом сопротивлении R_{a2} можно получить достаточную амплитуду выходного напряжения.

Так как величина напряжения $U_{вых}$ обычно задается, а $R_a = \frac{U_{вых}}{I_{a0}}$, где I_{a0} — ток лампы $Л_2$ при нулевом напряжении на сетке, то при выборе лампы $Л_2$ следует проверить, отдает ли она ток, нужный для получения заданной длительности $t_ф$ фронта выходного импульса:

$$I_{a0} = 3\frac{U_{вых}}{t_ф}C_n.$$

Обычно C_n составляет 40 — 60 *пф*.

В спусковом устройстве с анодно-сеточными связями условие развития цепной реакции (условие возникновения скачка) требует, чтобы общий коэффициент усиления устрой-

ства был больше единицы. Иными словами, напряжение обратной связи, подводимое к сетке лампы, должно быть больше вызвавшего его изменения напряжения на сетке этой же лампы, т. е. $\Delta u_{o.c} > \Delta u_c$.

Изменение напряжения обратной связи $\Delta u_{o.c}$ от изменения напряжения Δu_c на сетке лампы будет тем больше, чем больше общий коэффициент усиления K схемы и чем большая доля β изменения напряжения на аноде лампы передается через делитель из сопротивлений R_1 и R_2 на сетку другой лампы $\left(\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$.

При одном и том же коэффициенте усиления K условия для развития цепной реакции будут тем лучше, чем больше β. Так как сопротивление R_1 надо выбирать большим по сравнению с сопротивлением R_a анодной нагрузки (чтобы R_1 не влияло на коэффициент усиления каскада), то увеличение β может быть осуществлено только за счет увеличения R_2. Однако при этом следует иметь в виду следующее. Во время устойчивого состояния напряжение на сетке открытой лампы равно нулю, так как при этом сопротивление участка сетка — катод мало. На сетке же закрытой лампы напряжение должно быть ниже потенциала запирания. Это напряжение складывается из отрицательного по отношению к сетке напряжения смещения, образующегося на катодном сопротивлении $R_к$, и β — доли положительного напряжения, поступающего с анода открытой лампы. Чем сопротивление R_2 больше (чем больше β), тем больше эта доля, тем требуется большее напряжение смещения. Поэтому обычно сопротивление R_2 выбирают не более $(0{,}1 \div 0{,}5)\, R_1$ и оно имеет порядок сотен килоом.

Величины сопротивлений R_a анодных нагрузок, как уже указывалось, могут быть ориентировочно подсчитаны по формуле

$$R_a = \frac{U_{вых}}{I_{a0}}.$$

Обычно они имеют порядок десятков килоом.

Для того чтобы подсчитать величину катодного сопротивления $R_к$, надо предварительно определить необходимое напряжение смещения $U_{см}$. Оно должно быть выбрано так, чтобы при надежно запертой лампе другая лампа была

открыта. Очевидно, что лампа будет открыта в том случае, если положительное напряжение, поступающее на ее сетку с анода закрытой лампы через делитель из сопротивлений R_1 и R_2, будет больше отрицательного напряжения смещения:

$$U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2} > |U_{см}|.$$

На сетке же закрытой лампы отрицательное напряжение смещения должно быть больше суммы β-доли положительного напряжения, поступающего с анода открытой лампы, и абсолютной величины потенциала запирания лампы:

$$|U_{см}| > u_a \frac{R_2}{R_1 + R_2} + |U_{c0}|,$$

где u_a — напряжение между анодом открытой лампы и минусом источника анодного питания.

Катодное сопротивление

$$R_к = \frac{U_{см}}{I_{a0}}.$$

Емкость конденсатора $C_к$ обычно берется в пределах 0,01 — 0,1 *мкф*.

В схеме спускового устройства с катодной связью соотношение сопротивлений R_1 и R_2 выбирается 1 : (0,5—1,0). Анодные сопротивления обычно составляют 5 — 10 *ком*, а величина катодного сопротивления должна удовлетворять неравенству

$$R_к > \frac{|U_{c0}|}{I_{a0}}.$$

В процессе наладки устройства оно подбирается экспериментально в пределах 1—4 *ком*.

9. Мультивибраторы

Мультивибратором называется автоколебательное устройство для получения релаксационных колебаний.

Мультивибратор и по схеме и по принципу действия похож на спусковое устройство и, по существу, является тем же двухкаскадным усилителем с положительной обратной связью. Так же как и спусковое устройство, мультивибратор из одного состояния в другое переходит скачками.

Но между спусковым устройством и мультивибратором есть и существенная разница: в мультивибраторе в отличие от спускового устройства нет устойчивого состояния равновесия. В промежутках между скачками мультивибратор находится во временно-устойчивом состоянии. Из одного такого состояния в другое мультивибратор переходит (как это было в спусковых устройствах) скачком.

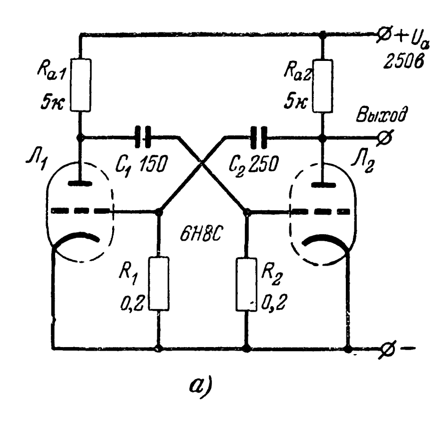
На рис. 41 приведена схема **самовозбуждающегося мультивибратора с анодно-сеточными связями**. В отличие от схемы спускового устройства сопротивления, связывающие анод одной лампы с сеткой другой, заменены конденсаторами. Рассмотрим принцип действия схемы.

Допустим, что в исходном состоянии схема находилась в равновесии, когда токи обеих ламп были одинаковы: Вследствие случайных причин это равновесное состояние нарушается. Предположим, что ток через лампу $Л_1$ уменьшился. Это приводит к увеличению напряжения на аноде этой лампы. Конденсатор C_1 при этом начинает заряжатся, причем ток его заряда будет протекать через сопротивление R_2, создавая падение напряжения на этом сопротивлении, положительное по отношению к сетке лампы $Л_2$. В результате ток через лампу $Л_2$ увеличивается, а напряжение на ее аноде упадет.

Конденсатор C_2 до этого был заряжен до напряжения на аноде лампы $Л_2$. Поэтому теперь, когда на нем оказался избыток напряжения, конденсатор начинает разряжаться через эту лампу и сопротивление R_1, создавая на сопротивлении падение напряжения, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_1$.

Таким образом, уменьшение тока через лампу $Л_1$ привело к уменьшению напряжения на ее сетке, т. е. к новому уменьшению тока через эту лампу. Так как лампы $Л_1$ и $Л_2$ открыты и коэффициент усиления устройства больше единицы, выполняется условие развития цепной реакции, в результате которой лампа $Л_1$ очень быстро закроется и устройство перейдет в состояние, в котором лампа $Л_1$ закрыта, а лампа $Л_2$ открыта.

В таком состоянии мультивибратор может оставаться только до тех пор, пока лампа $Л_1$ закрыта и коэффициент усиления меньше единицы. Это будет, если ток разряда конденсатора C_2 через лампу $Л_2$ и сопротивление R_1 достаточно велик. Только в этом слу-



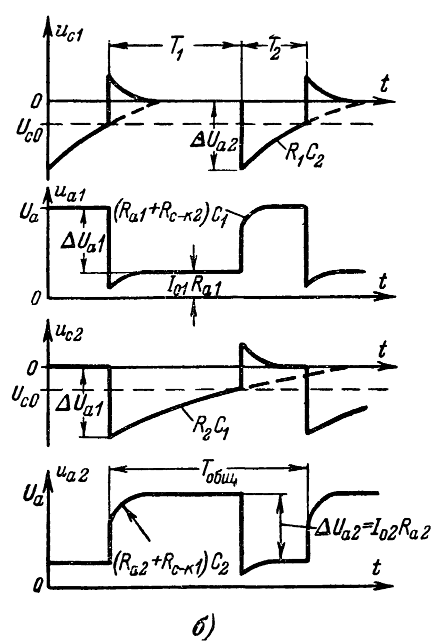


Рис. 41. Самовозбуждающийся мультивибратор.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

чае падение напряжения на сопротивлении R_1 велико и достаточно для запирания этой лампы.

Ток разряда конденсатора убывает экспоненциально. Через некоторое время ток разряда уменьшится настолько, что падение напряжения на сопротивлении R_1 станет меньше потенциала запирания лампы $Л_1$. Лампа откроется, появится анодный ток, напряжение на ее аноде уменьшится и начнется разряд конденсатора C_1, заряженного за время, пока лампа $Л_1$ была заперта, до напряжения U_a анодного питания. Ток разряда этого конденсатора проходит через лампу $Л_1$ и сопротивление R_2, создавая на нем падение напряжения, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_2$. Ток лампы $Л_2$ будет уменьшаться, напряжение на ее аноде увеличиваться и конденсатор C_2 начнет заряжаться. Ток его заряда проходит через сопротивление R_1, создавая на нем падение напряжения, положительное по отношению к сетке лампы $Л_1$. Это вызывает дальнейшее увеличение тока этой лампы, т. е. развивается цепная реакция, и устройство скачком переходит в другое состояние, в котором лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта. Мультивибратор останется в таком состоянии до

тех пор, пока ток разряда конденсатора C_1 не спадет настолько, что падение напряжения на сопротивлении R_2 станет меньше потенциала запирания лампы $Л_2$ и лампа откроется. Тогда новый скачок в прежнее временноустойчивое состояние и т. д.

Рассмотрим диаграммы напряжений на различных участках схемы мультивибратора (рис. 41,*б*). За исходное состояние примем момент, когда в результате уменьшения тока разряда конденсатора C_2 лампа $Л_1$ открывается и в схеме происходит скачок. При этом напряжение на сетке лампы $Л_1$ скачком увеличивается и становится выше нуля, так как напряжение на аноде закрывшейся лампы $Л_2$ возросло и начался заряд конденсатора C_2. Ток заряда этого конденсатора после открытия лампы $Л_1$ протекает по цепи R_{a2} — C_2 и участок сетка — катод лампы $Л_1$, сопротивление $R_{с\text{-}к1}$ которого в открытой лампе невелико (порядка 1 000 *ом*) по сравнению с сопротивлением R_1. Поэтому можно считать, что весь ток заряда конденсатора проходит через участок сетка — катод лампы. Таким образом постоянная времени заряда конденсатора

$$\tau_з = (R_{a2} + R_{с\text{-}к})\,C_2.$$

Пока происходит заряд конденсатора C_2 на сопротивлении R_{a2}, существует падение напряжения, обусловленное прохождением по этому сопротивлению тока заряда. Поэтому напряжение на аноде этой лампы, а следовательно, и на выходе мультивибратора сделается равным напряжению U_a питания не сразу после скачка, а только по окончании заряда конденсатора C_2 до этого напряжения.

Напряжение на аноде лампы $Л_1$ в момент скачка падает до некоторой минимальной величины, определяемой напряжением на сетке лампы $Л_1$, зависящем от тока заряда конденсатора C_2. По мере прекращения заряда конденсатора напряжение на сетке лампы $Л_1$ убывает и после окончания заряда конденсатора становится равным нулю. В течение этого времени напряжение на аноде лампы $Л_1$ несколько увеличивается и после окончания заряда конденсатора становится

$$u_{a1} = U_a - I_{01} R_{a1}.$$

Таким образом, скорость заряда конденсатора C_2 определяет форму напряжения на выходе мультивибратора. Чем больше скорость заряда, тем прямоугольнее выходное напряжение.

В момент скачка с открытием лампы $Л_1$ начинается разряд конденсатора C_1 через эту лампу и сопротивление R_2. Скорость разряда определяет длительность временно-устойчивого состояния или, что то же, длительность выходного импульса. Действительно, эта длительность определяется промежутком времени, в течение которого (считая от момента скачка) ток разряда конденсатора упадет настолько, что отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ станет меньше потенциала запирания, лампа откроется и произойдет скачок. Таким образом, новый скачок произойдет в момент, когда

$$i_{C1}R_2 = U_{c02},$$

где i_{C1} — ток разряда конденсатора C_1;

U_{c02} — потенциал запирания лампы $Л_2$.

Разряд конденсатора C_1 происходит экспоненциально, поэтому

$$i_{C1} = I_{C01}e^{-\frac{t}{R_2C_1}},$$

где I_{C01} — ток в начале разряда конденсатора, т. е. в момент открытия лампы $Л_1$.

В соответствии с этим предыдущее равенство можно переписать:

$$U_{c02} = I_{C01}R_2e^{-\frac{T_1}{R_2C_1}},$$

где T_1 — время, прошедшее с момента начала разряда конденсатора.

Выразим начальный ток разряда I_{C01} конденсатора C_1. Очевидно, что этот ток тем больше, чем больше скачок напряжения ΔU_{a1} (рис. 41,*б*), равный $I_{01}R_{a1}$. Поэтому

$$I_{C01} = \frac{\Delta U_{a1}}{R_2} = \frac{I_{01}R_{a1}}{R_2},$$

где I_{01} — ток лампы $Л_1$ при нулевом напряжении на сетке.

Отсюда получаем:

$$U_{C02} = \frac{I_{01}R_{a1}}{R_2}R_2e^{-\frac{T_1}{R_2C_1}} = I_{01}R_{a1}e^{-\frac{T_1}{R_2C_1}}.$$

Из этого равенства можно выразить длительность T_1 выходного импульса

$$T_1 = R_2 C_1 \ln \frac{I_{01} R_{a1}}{U_{C02}}.$$

После нового скачка и закрытия лампы $Л_1$ начинается перезаряд конденсаторов, которые теперь меняются ролями: разряд конденсатора C_2 определяет длительность T_2 второго временно-устойчивого состояния, а заряд конденсатора C_1 определяет форму напряжения на выходе мультивибратора. Длительность

$$T_2 = R_1 C_2 \ln \frac{I_{02} R_{a2}}{U_{C01}}.$$

Общий период колебаний мультивибратора $T_{общ} = T_1 + T_2$. В симметричной схеме T_1 равен T_2. Если от мультивибратора требуется получить импульсы с разными T_1 и T_2, то конденсаторы C_1 и C_2 должны быть разной емкости. При этом надо иметь в виду, что если емкость одного конденсатора будет значительно превышать емкость другого, то, несмотря на то, что заряд конденсатора происходит быстрее разряда, может оказаться, что конденсатор большой емкости не успеет зарядиться к моменту окончания разряда другого конденсатора и работа мультивибратора будет нарушена. Обычно $T_{мин}$ не может быть меньше $0{,}1\,T_{общ}$.

Из приведенных ранее рассуждений следует, что для получения возможно более прямоугольной формы выходного напряжения следует обеспечить возможно быстрый заряд конденсатора, присоединенного к аноду закрытой лампы. Скорость этого заряда определяется величиной сопротивления R_a в цепи анода, емкостью конденсатора и сопротивлением $R_{с\text{-}к}$ лампы. Так как последнее сопротивление зависит от выбранной лампы, то увеличить скорость заряда конденсатора можно только путем уменьшения R_a и C. Но емкость конденсатора C должна быть в 10—15 раз больше входной емкости лампы, иначе полученные формулы длительности T_1 и T_2 потеряют смысл и работа мультивибратора будет сильно зависеть от паразитных емкостей схемы. Поэтому емкость конденсаторов C_1 и C_2 всегда больше 100 *пф*. Уменьшать же сопротивление R_a менее 1 *ком* тоже нельзя, так как при этом значительно

уменьшится амплитуда выходного напряжения и снизится коэффициент усиления устройства, т. е. увеличится длительность опрокидывания. Обычно эти сопротивления выбираются в пределах 1—20 *ком.*

Сопротивления в цепях сеток ламп обычно имеют порядок сотен килоом.

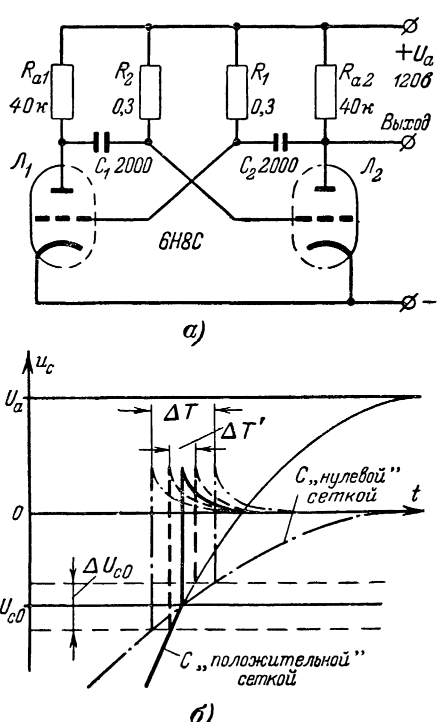


Рис. 42. Мультивибратор с „положительными" сетками.

а — принципиальная схема; *б* — нарастание напряжения на сетке лампы в схеме с „нулевой" и в схеме с „положительной" сеткой.

Требования, предъявляемые в схемах мультивибраторов к лампам, те же, что и в схемах спусковых устройств.

Мы видели, что моменты скачков, т. е. длительность вырабатываемых мультивибратором импульсов определяется моментами открывания запертых до этого ламп. Поэтому стабильность частоты мультивибратора зависит от постоянства потенциала запирания ламп схемы. На величину этого потенциала оказывают влияние многие факторы, в том числе величина напряжения анодного питания, фон и т. д.

Чтобы уменьшить зависимость выходного напряжения от изменения потенциала запирания, надо увеличить скорость нарастания напряжения на сетках ламп в момент опрокидывания устройства. Это сделано в схеме с «положительной» сеткой (рис. 42), которая работает следующим образом.

Предположим, что лампа $Л_1$ закрыта, а лампа $Л_2$ открыта. Тогда напряжение на аноде лампы $Л_1$ велико, и конденсатор C_1 заряжается по цепи R_{a1}—C_1 и участок сетка — катод открытой лампы $Л_2$, сопротивление которого

в это время мало. Поэтому конденсатор заряжается быстро; после окончания заряда напряжение на сетке лампы $Л_2$ равно нулю.

Конденсатор C_2, заряженный ранее, когда лампа $Л_2$ была заперта, до напряжения U_a, в это время разряжается через открытую теперь лампу $Л_2$, внутреннее сопротивление источника анодного напряжения и сопротивление R_1. Падение напряжения на сопротивлении R_1 от прохождения по нему тока разряда конденсатора отрицательно по отношению к сетке лампы $Л_1$ и ниже потенциала запирания. Поэтому лампа заперта.

После того как ток разряда конденсатора C_2 уменьшится настолько, что падение напряжения на сопротивлении R_1 станет меньше потенциала запирания лампы $Л_1$, эта лампа откроется и начнется разряд конденсатора C_1 через нее и сопротивление R_2. В результате разовьется цепная реакция, произойдет скачок и закроется теперь уже лампа $Л_2$. Таким образом, в начале разряда конденсатора C_2 (это же относится и к разряду конденсатора C_1), когда ток разряда максимален, падение напряжения на сопротивлении R_1 тоже максимально, и сетка лампы $Л_1$ находится под отрицательным напряжением. Если бы лампа $Л_1$ в дальнейшем не открывалась, то в результате спадания тока разряда конденсатора C_2 падение напряжения на сопротивлении R_1 все время уменьшалось бы. Наконец, после прекращения разряда конденсатора падение напряжения на сопротивлении R_1 сделалось бы равным нулю, а это значит, что потенциал сетки лампы $Л_1$ сделался бы равным $+U_a$. Поэтому в схеме с «положительной» сеткой напряжение на сетке закрытой лампы стремится к $+U_a$ и нарастание сеточного напряжения происходит интенсивнее, чем в схеме с «нулевой» сеткой, в которой напряжение на сетке закрытой лампы стремится к нулю (рис. 42,*б*).

Период $T_{общ}$ мультивибратора с „положительной“ сеткой можно определить по формуле

$$T_{общ} = T_1 + T_2 = R_1 C_2 \ln\left(1 + \frac{\Delta U_{a2}}{U_a}\right) + R_2 C_1 \ln\left(1 + \frac{\Delta U_{a1}}{U_a}\right),$$

где ΔU_{a1} и ΔU_{a2} — скачки напряжения на анодах ламп (рис. 41,*б*).

Нагрузочная цепь, подключенная к выходу мультивибратора, искажает форму выходных импульсов. Чтобы устранить это, мультивибратор может быть собран на пентодах по схеме с электронной связью (рис. 43). Здесь роль анодов в схеме мультивибратора выполняют экранирующие сетки. За счет изменения электронного потока ламп напряжение на анодах повторяет форму напряжения экранирующих сеток. Поскольку конденсаторы связи не подключены к анодам в момент запирания ламп, напряжение на анодах возрастает до максимального значения скачком: форма выходного напряжения получается более прямоугольной.

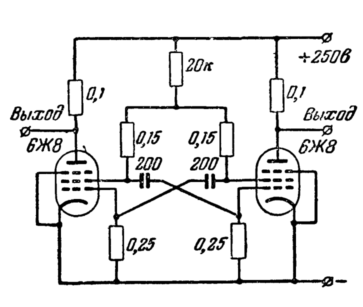


Рис. 43. Мультивибратор на пентодах.

Существуют схемы, у которых имеется только одно временно-устойчивое состояние, другое же состояние — устойчиво. Такие схемы носят название ждущих мультивибраторов (рис. 44).

В исходном положении схема находится в устойчивом состоянии. В момент прихода запускающего импульса ждущий мультивибратор скачком переходит во временноустойчивое состояние, из которого спустя некоторое время вновь возвращается скачком в прежнее устойчивое состояние. Каждому запускающему импульсу соответствует один импульс на выходе мультивибратора (поэтому такой мультивибратор иногда называют однопериодным). Это свойство ждущего мультивибратора широко используется в импульсной и измерительной технике.

Рассмотрим работу схемы. Предположим, что в результате предыдущего скачка лампа $Л_1$ находится в открытом состоянии. Напряжение на ее аноде мало и недостаточно для компенсации отрицательного напряжения от источника $-E_c$. Поэтому лампа $Л_2$ заперта, а конденсатор C заряжен до напряжения U_a. Напряжение на сетке лампы $Л_1$ равно нулю.

В таком положении схема может оставаться сколько угодно долго. Запуск производится положительным импульсом, поступающим на сетку лампы $Л_2$ (или отрицательным на сетку лампы $Л_1$). Амплитуда импульса должна быть такой, чтобы суммарное напряжение на сетке

лампы $Л_2$ стало меньше потенциала запирания. При этом лампа откроется и начнется разряд конденсатора C. Ток разряда проходит через лампу и сопротивление R_2, создавая на нем падение напряжения, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_1$. Это вызывает уменьшение тока лампы $Л_1$, увеличение напряжения на ее аноде, а следовательно, дальнейшее уменьшение отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. Развивается цепная реакция, в результате которой происходит скачок, лампа $Л_1$ закрывается, а лампа $Л_2$ открывается.

В таком состоянии мультивибратор будет находиться до тех пор, пока ток разряда конденсатора C не упадет настолько, что отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_1$ станет меньше потенциала запирания. При этом лампа $Л_1$ откроется, напряжение на ее аноде уменьшится, а это вызовет уменьшение напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. В результате развившегося скачка мультивибратор вернется в прежнее устойчивое состояние.

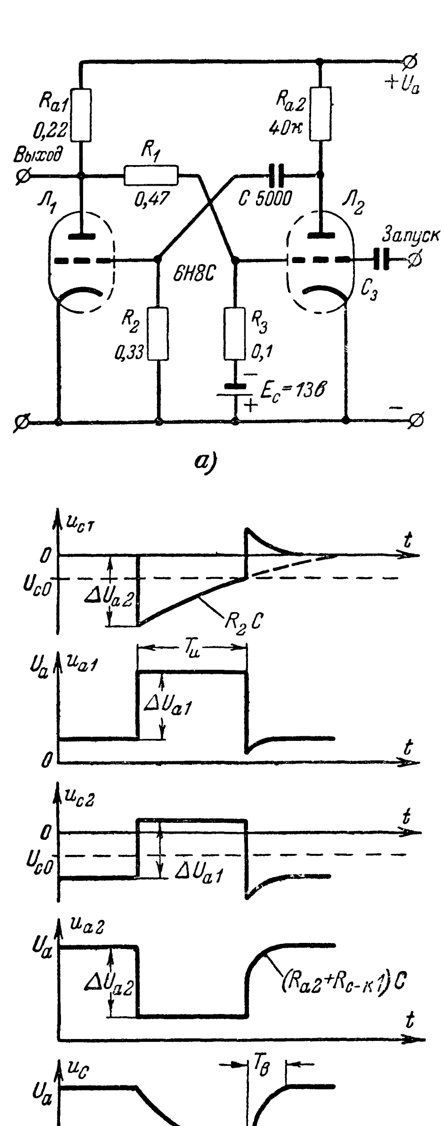


Рис. 44. Ждущий мультивибратор с анодно-сеточными связями.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

Из диаграммы напряжений в схеме (рис. 44,*б*) видно, что форма напряжений на анодах ламп несколько отличается от прямоугольной. Величина этого отклонения определяется скоростью заряда конденсатора *С*. После того как в схеме произошел обратный скачок, напряжение на сетке лампы $Л_1$ становится положительным. Абсолютная величина скачка этого напряжения равна напряжению на конденсаторе в этот момент. Далее начинается заряд конденсатора *С*. Ток заряда протекает через участок сетка — катод лампы $Л_1$, сопротивление которого $R_{с\text{-}к}$ значительно меньше сопротивления R_2, через которое протекал ток разряда конденсатора. Поэтому заряд конденсатора происходит быстрее разряда.

После опрокидывания в устойчивое состояние напряжение на аноде лампы $Л_2$ возрастает первоначально скачком на величину, равную скачку напряжения на сетке лампы $Л_1$, а потом нарастает пропорционально заряду конденсатора, определяемому постоянной времени $(R_{с\text{-}к} + R_{а2})\,C$. Уменьшить время заряда конденсатора можно только за счет уменьшения емкости конденсатора *С*, так как сопротивления $R_{с\text{-}к}$ и $R_{а2}$ определяются лампами и требованием получения достаточно большого коэффициента усиления для быстрого опрокидывания. Но с уменьшением емкости конденсатора *С* уменьшается длительность выходного импульса.

Процесс работы ждущего мультивибратора делится на два этапа: формирование выходного импульса и восстановление исходного состояния. После обратного опрокидывания мультивибратор не сразу готов к генерированию нового импульса. Необходимо некоторое время на то, чтобы в схеме закончились переходные процессы: конденсатор *С* должен зарядиться до напряжения источника питания $U_а$ через сопротивление $R_{а2}$ анодной нагрузки и сопротивление участка сетка — катод лампы $Л_1$.

Этап формирования импульса состоит из начального опрокидывания, разряда конденсатора *С* через сопротивление R_2 и участок анод — катод лампы $Л_2$ и обратного опрокидывания. Длительность опрокидывания обычно очень мала, поэтому длительность выходного импульса зависит в основном от продолжительности разряда конденсатора *С*:

$$T_и = R_2 C \ln \frac{U_а - I_{02} R_{а2}}{U_{с01}}.$$

Эта формула не учитывает влияния внутреннего сопротивления лампы $Л_2$, через которое проходит ток разряда конденсатора, но для прикидочных подсчетов она вполне пригодна.

Этап восстановления заключается в заряде конденсатора C до напряжения U_a. Так как заряд происходит через сопротивление участка сетка — катод открывшейся лампы $Л_1$, которое много меньше сопротивления R_2, то длительность заряда конденсатора меньше длительности разряда и обычно составляет:

$$T_в \approx 4{,}6 R_{с\text{-}к1} C.$$

На рис. 45 представлена схема ждущего мультивибратора с катодной связью. Это одна из наиболее распространенных схем ждущего мультивибратора.

В устойчивом состоянии лампа $Л_2$ открыта, так как ее сетка через большое сопротивление R_1 присоединена к плюсу анодного напряжения. Потенциал сетки относительно катода близок к нулю, ибо сопротивление участка сетка— катод открытой сейчас лампы $Л_2$ много меньше сопротивления $R_1 \approx 1$ *Мом.*

Через лампу $Л_2$ проходит ток I_{02}, который создает на сопротивлении $R_к$ напряжение, запирающее лампу $Л_1$. Конденсатор C при этом заряжен через цепь R_{a1}, C, участок сетка — катод лампы $Л_2$ и $R_к$ до напряжения $U_a - I_{02}R_к$.

Напряжение U_p выбрано таким, что оно недостаточно для отпирания лампы $Л_1$, поэтому в таком положении мультивибратор может оставаться сколько угодно долго. Для запуска надо подать на сетку лампы $Л_1$ положительный импульс такой амплитуды, чтобы суммарное напряжение на сетке лампы стало меньше потенциала запирания.

Начинается разряд конденсатора C через открывшуюся лампу $Л_1$ и сопротивление R_1. В результате напряжение на сетке лампы $Л_2$ становится отрицательным, анодный ток этой лампы падает, а значит уменьшается напряжение на сопротивлении $R_к$, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_1$. Происходит скачок, и лампа $Л_2$ закрывается.

В таком состоянии мультивибратор остается до тех пор, пока ток разряда конденсатора C не упадет настолько, что отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ станет меньше потенциала запирания. В этот момент лампа $Л_2$ откроется. Ее анодный ток создаст на сопротивлении $R_к$ дополнительное падение напряжения, которое вызовет

уменьшение анодного тока лампы $Л_1$ и увеличение напряжения на ее аноде. В свою очередь, это приведет к дальнейшему уменьшению отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. Происходит скачок, лампа $Л_1$ запирается, а лампа $Л_2$ открывается. На этом заканчивается цикл работы мультивибратора, и он остается в устойчивом состоянии до прихода нового запускающего импульса.

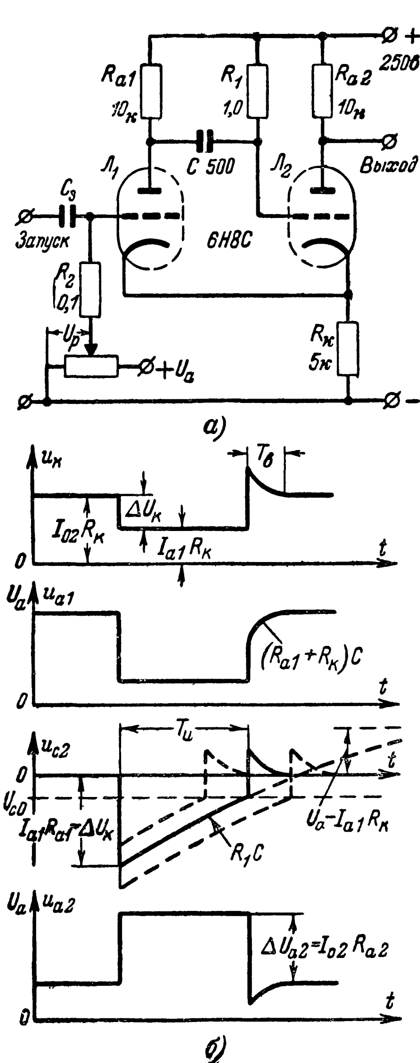


Рис. 45. Ждущий мультивибратор с катодной связью.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

Длительность импульса ждущего мультивибратора определяется не только постоянной времени R_1C, но зависит и от величины напряжения U_p. Отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ достигнет потенциала отпирания тем скорее, чем меньше будет скачок этого напряжения в момент первого опрокидывания мультивибратора. Величина этого скачка равна скачку напряжения $I_{a1}R_{a1}$ на аноде лампы $Л_1$. Таким образом, чем больше ток I_{a1} лампы $Л_1$, тем больше длительность выходного импульса. Величина этого тока зависит от напряжения на сетке этой лампы, а следовательно, от напряжения U_p. Изменяя U_p, можно регулировать длительность выходного импульса (рис. 45,*б*). Чем больше это напряжение, тем боль-

ше $T_и$. Время $T_и$ тожно регулировать также сопротивлением $R_к$, ибо при этом тоже изменяется ток лампы $Л_1$.

После обратного опрокидывания мультивибратор не сразу готов к новому запуску, так как необходимо, чтобы сначала закончился заряд конденсатора C. Заряд происходит через сопротивление R_{a1} и участок сетка — катод открытой лампы $Л_2$, а также через сопротивление $R_к$. Поэтому заряд заканчивается быстро. Обычно длительность этого заряда не превосходит 20% от длительности $T_и$ выходного импульса. Как видно из рис. 45*б*, заряд конденсатора C вызывает пики напряжения на аноде и сетке лампы $Л_2$, а также искажает прямоугольную форму напряжения на аноде лампы $Л_1$.

Амплитуда запускающего положительного импульса должна быть такой, чтобы закрытая до этого лампа $Л_1$ открылась. Она зависит от величины напряжения U_p и изменяется с изменением длительности выходного импульса. Обычно амплитуда запускающего импульса не превышает десятка вольт. Не следует стремиться к чрезмерному ее увеличению, так как если результирующее напряжение на сетке лампы $Л_1$ становится выше нуля, то появляется сеточный ток, который заряжает конденсатор C_3. Этот конденсатор разряжается на сопротивление R_2 и тем самым изменяет напряжение U_p, а значит, и длительность выходного импульса.

При выборе величины сопротивления $R_к$ следует исходить из тех соображений, что в устойчивом состоянии мультивибратора лампа $Л_1$ должна быть надежно заперта. Поэтому суммарное напряжение на сетке этой лампы, складывающееся из напряжения U_p и напряжения смещения $I_{02} R_к$, должно быть выше потенциала запирания U_{c01} лампы $Л_1$:

$$U_{c01} < R_к I_{02} - U_p .$$

Отсюда минимальная величина $R_к$

$$R_{к.мин} = \frac{U_{c1} - U_p}{I_{02}} .$$

Если это условие не выполнено и сопротивление $R_к$ меньше $R_{к.мин}$, то лампа $Л_1$ не закроется, и мультивибратор перейдет в режим самовозбуждения.

Анодные сопротивления R_a обычно берутся в пределах 5 — 10 *ком*. Величина сопротивления R_1 выбирается до 2 *Мом*, а емкость конденсатора C — от сотен до нескольких десятков тысяч пикофарад

10. Блокинг-генераторы

Блокинг-генератор предназначен для генерирования кратковременных импульсов. В отличие от спусковых устройств и мультивибраторов обратная связь в нем создается при помощи импульсного трансформатора. Импульсы, вырабатываемые блокинг-генератором, имеют очень крутые фронты и спады и по форме близки к прямоугольным.

Блокинг-генератор содержит одну электронную лампу, которая открывается только на время генерирования импульса; остальное время она заперта. Обычно блокинг-генератор работает в режиме большой скважности, т. е. длительность выходных импульсов много меньше периода их следования. Поэтому время, в течение которого лампа открыта, много меньше времени, когда лампа закрыта.

Как известно, максимальная мощность, которую можно получить от лампы, определяется допустимой мощностью рассеивания на ее электродах. Так как лампа в схеме блокинг-генератора бо́льшую часть времени закрыта — лампа работает в импульсном режиме — то средние мощности, рассеиваемые на ее электродах, невелики, хотя во время генерирования импульсов пиковые мощности могут доходить до очень больших величин, в сотни, а иногда даже в тысячи раз превосходящие номинальные для обычного режима работы.

Кроме этого, в импульсном режиме эффективность лампы еще увеличивается за счет явления импульсной эмиссии катода, которая заключается в том, что в течение короткого времени катод может отдавать значительно больший ток эмиссии, чем обычно. Поэтому от обычной приемно-усилительной лампы в схеме блокинг-генератора можно получить очень большую мощность во время генерирования импульсов.

Все это обеспечило блокинг-генераторам очень широкое применение в импульсной технике.

Рассмотрим работу схемы блокинг-генератора (рис. 46). Предположим, что в результате происшедших в схеме процессов конденсатор C заряжен отрицательно по отношению к сетке лампы. Поэтому лампа заперта, а конденса-

тор разряжается через большое сопротивление R и сеточную обмотку трансформатора $Тр$. Так как сопротивление R велико, то ток разряда конденсатора C очень мал, и напряжение, индуктируемое в анодной обмотке трансформатора, практически равно нулю.

В таком положении блокинг-генератор остается до тех пор, пока в результате разряда конденсатора C отрицательное напряжение на сетке лампы не достигнет потенциала отпирания. В этот момент по анодной обмотке трансформатора начнет протекать ток лампы. Это вызовет появление на сеточной обмотке напряжения, полярность которого (благодаря соответствующему подключению концов обмотки) такова, что оно положительно относительно сетки лампы. Поэтому отрицательное напряжение на сетке резко уменьшается, а это приводит к дополнительному увеличению анодного тока лампы, и тем самым — к новому уменьшению отрицательного напряжения на сетке и т. д.

Развивается цепная реакция. Анодный ток лампы скачком (почти

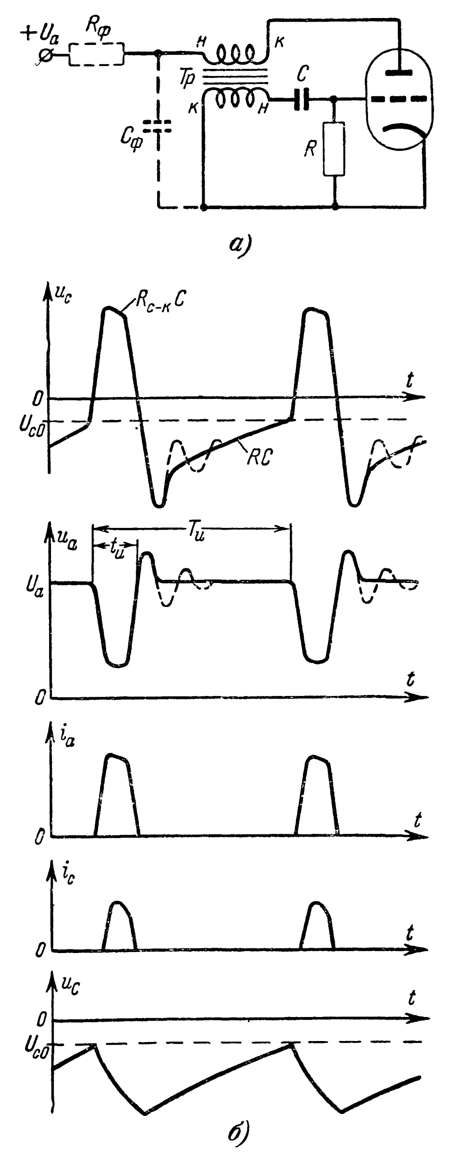


Рис. 46. Блокинг-генератор.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы

мгновенно) увеличивается, и это вызывает резкое уменьшение напряжения на сетке лампы, оно становится равным нулю, а затем положительным и появляется сеточный ток.

Напряжение на сетке лампы стремительно нарастает до тех пор, пока сеточный ток не составит большую долю катодного тока лампы. Крутизна характеристики лампы в этот момент падает настолько, что сетка перестает управлять током анода: увеличение положительного напряжения на сетке перестает вызывать увеличение анодного тока.

Таким образом, устройство в течение очень короткого промежутка времени переходит в новое состояние, в котором лампа открыта, а напряжение на аноде лампы скачком уменьшилось (рис. 46, *б*). На этом заканчивается этап формирования фронта выходного импульса.

Рассмотрим условия возникновения описанного скачка. Цепная реакция развивается лавинообразно (т. е. происходит скачок) в том случае, если новое изменение напряжения $\Delta u'_c$ на сетке лампы больше вызвавшего его предыдущего изменения напряжения Δu_c на сетке этой же лампы. Первоначальное изменение напряжения на сетке вызывает изменение анодного тока лампы

$$\Delta i_a = \Delta u_c S,$$

где S — крутизна характеристики лампы.

Это изменение анодного тока вызывает изменение тока в сеточной обмотке трансформатора, а значит, новое изменение тока в цепи сетки лампы

$$\Delta i_c = \frac{\Delta i_a}{n} = \frac{\Delta u_c S}{n},$$

где n — коэффициент трансформации.

Этот ток создает на сопротивлении $R_{c\text{-}к}$ участка сетка — катод открытой лампы дополнительное падение напряжения $\Delta u'_c$, положительное относительно сетки:

$$\Delta u'_c = \Delta i_c R_{c\text{-}к},$$

или, учитывая предыдущее:

$$\Delta u'_c = \frac{\Delta u_c S}{n} R_{c\text{-}к}.$$

Так как для развития скачка требуется, чтобы $\frac{\Delta u'_c}{\Delta u_c} > 1$,

то

$$\frac{\Delta u_c'}{\Delta u_c} = \frac{\Delta u_c S}{\Delta u_c n} R_{c\text{-}к} = \frac{S}{n} R_{c\text{-}к} > 1.$$

Отсюда: чем выше крутизна характеристики лампы, тем интенсивнее развивается цепная реакция. Это следует учитывать при выборе лампы для блокинг-генератора.

На скорость опрокидывания, а следовательно, и на длительность фронта и спада выходного импульса заметное влияние оказывают паразитные емкости схемы, состоящие из емкости монтажа, междувитковой емкости импульсного трансформатора, а также межэлектродных емкостей лампы. Поэтому эти емкости следует, по возможности, уменьшать путем рационального монтажа, соответствующего выбора лампы и т. д.

Продолжим рассмотрение работы схемы блокинг-генератора. В результате скачка лампа открыта, напряжение на ее аноде минимально, а напряжение на сетке, ток сетки и ток анода максимальны. Начинается этап формирования вершины выходного импульса.

Так как скачок происходит очень быстро, то напряжение на конденсаторе C практически не изменяется и остается таким, каким было в начале скачка (рис. 46,*б*). Затем начинается заряд конденсатора током сетки. Скорость заряда определяется постоянной времени цепи заряда $R_{c\text{-}к}$. По мере убывания тока заряда напряжение на сетке лампы уменьшается; однако оно еще столь велико, что лампа продолжает оставаться в области малой крутизны характеристики, и поэтому анодный ток и напряжение на аноде лампы остаются почти неизменными.

Наконец, напряжение на сетке лампы уменьшается настолько, что крутизна характеристики увеличивается и дальнейшее уменьшение напряжения на сетке приводит к уменьшению анодного тока лампы.

На этом этап формирования вершины выходного импульса заканчивается. Следует отметить, что длительность этого процесса, а значит, длительность выходного импульса зависит от скорости заряда конденсатора, которая определяется постоянной $R_{c\text{-}к} C$. Поэтому, изменяя емкость конденсатора C, можно регулировать длительность выходного импульса. Этим способом часто пользуются на практике.

Далее в схеме развивается второй скачок, который возвращает блокинг-генератор в исходное состояние. Когда

напряжение на сетке лампы уменьшится настолько, что анодный ток лампы начнет следовать за изменением сеточного напряжения, в сеточной обмотке трансформатора индуктируется напряжение, полярность которого отрицательна по отношению к сетке лампы. Это вызовет еще большее уменьшение напряжения на сетке, что приведет к дальнейшему уменьшению анодного тока и т. д. Развивается лавинообразный процесс, в результате которого лампа очень быстро закрывается.

Резкое спадание анодного тока приводит к тому, что в обмотках трансформатора индуктируются большие напряжения. В сеточной обмотке напряжение отрицательно, а в анодной обмотке положительно и больше напряжения U_a питания (рис. 46,*б*). Затем эти выбросы напряжения спадают. Для того чтобы процесс не был колебательным (рис. 46,*б* — пунктир), обмотки трансформатора часто шунтируют сопротивлением.

Начинается последний этап работы блокинг-генератора (промежуток между импульсами), в течение которого конденсатор C разряжается через сопротивление R и сеточную обмотку трансформатора. При этом отрицательное напряжение на сетке лампы медленно спадает. Так как лампа заперта, напряжение на ее аноде при этом неизменно. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на сетке не станет меньше потенциала запирания. Тогда произойдет новый скачок и начнется следующий цикл работы блокинг-генератора.

Сопротивление R, через которое разряжается конденсатор, много больше сопротивления $R_{с\text{-}к}$ участка сетка — катод открытой лампы, через которое конденсатор заряжался во время формирования вершины импульса. Поэтому длительность интервала между импульсами много больше длительности импульса и приближенно равна постоянной времени цепи RC. Отсюда частота следования выходных импульсов примерно может быть подсчитана по формуле

$$F \approx \frac{1}{RC}.$$

Частота импульсов зависит от величины сопротивления R. Изменяя это сопротивление, можно регулировать частоту блокинг-генератора. Форма выходных импульсов при этом остается практически неизменной. Частота может изменяться от десятков герц до сотен килогерц.

Длительность выходных импульсов может изменяться от десятых долей микросекунды до десятков микросекунд.

Для того чтобы блокинг-генератор обеспечил нужную длительность t_u выходных импульсов, необходимо соответствующим образом выбрать емкость конденсатора C.

Емкость конденсатора C должна быть больше входной емкости лампы, иначе при смене лампы будут значительно изменяться параметры выходных импульсов.

При выборе лампы для блокинг-генератора, в качестве которой могут быть взяты триоды 6Н8С, 6Н9С, пальчиковые триоды 6Н1П, 6Н15П и т. д., необходимо учитывать, что в момент генерирования импульса сеточный ток лампы максимален и мощность, рассеиваемая на сетке, велика. Поэтому максимальная мощность, отдаваемая лампой, в большинстве случаев определяется тепловым режимом сетки.

Во время генерирования импульса источник напряжения U_a, питающий схему блокинг-генератора, должен отдать большой ток. Если источник питает не только схему блокинг-генератора, то на анодах других ламп в этот момент напряжение упадет. Чтобы этого не случилось, схему блокинг-генератора следует питать через фильтр $R_ф$—$C_ф$ (рис. 46,*а* — пунктир). На конденсаторе $C_ф$ в промежутках между импульсами запасается энергия, отдаваемая в схему в момент генерирования импульса. Емкость этого конденсатора составляет десятые или сотые доли микрофарады, а сопротивление $R_ф$ выбирается с таким расчетом, чтобы конденсатор успевал подзарядиться в промежутках между импульсами:

$$R_ф = 1{,}6 \frac{T_u}{C_ф}.$$

Весьма ответственной частью блокинг-генератора является импульсный трансформатор. Для того чтобы в схеме происходили резкие скачки, паразитные емкости и индуктивности должны быть минимальными. Поэтому трансформаторы блокинг-генераторов имеют сердечник из материала с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис, что позволяет значительно уменьшить количество витков обмоток (до сотен, а иногда десятков), а следовательно, уменьшить и паразитные емко-

сти и индуктивности рассеяния. При столь быстрых изменениях тока, какие имеют место в схеме блокинг-генератора, к сердечнику трансформатора предъявляются жесткие требования. При очень коротких импульсах и, следовательно, очень быстрых изменениях магнитного потока резко возрастают потери на вихревые токи. Поэтому пластины сердечника изготавливаются из пермаллоя или другого подобного материала с очень малой толщиной пластин (до 0,01 *мм*). Отдельные пластины изолируются друг от друга. При намотке трансформатора вначале наматывается сеточная обмотка, потом анодная; иногда между ними для уменьшения емкости прокладывается незамкнутый металлический экран. Отношение количества витков анодной и сеточной обмоток порядка 1 : 1—1 : 0,5.

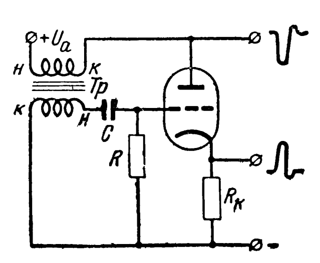


Рис. 47. Отрицательный выходной импульс снимается с анода лампы блокинг-генератора, а положительный — с катодного сопротивления $R_к$.

Обычно для передачи импульсов блокинг-генератора во внешнюю цепь на его трансформаторе имеется дополнительная нагрузочная обмотка. Подбором числа витков этой обмотки добиваются согласования внешней цепи с параметрами блокинг-генератора. Кроме того, применение нагрузочной обмотки позволяет получить импульс любой полярности.

При монтаже схемы блокинг-генератора обмотки трансформатора необходимо включить так, чтобы в схеме осуществлялась положительная обратная связь между анодом и сеткой лампы. Для этого при намотке обмоток в одну сторону и присоединении, например, конца анодной обмотки к аноду лампы конец сеточной обмотки должен быть заземлен. Включение нагрузочной обмотки зависит от требуемой полярности выходных импульсов.

Выходные импульсы могут быть сняты и без помощи нагрузочной обмотки. Отрицательные импульсы снимаются непосредственно с анода лампы (рис. 47). Для получения положительных выходных импульсов в катодную цепь лампы включается небольшое сопротивление 10—500 *ом*. В этом случае импульсы снимаются с катода.

Для повышения стабильности параметров выходных импульсов может быть применена схема блокинг-генера-

тора с «положительной» сеткой (рис. 48). Сущность работы этой схемы та же, что и аналогичной схемы мультивибратора. Частота блокинг-генератора в этой схеме при тех же величинах деталей больше, чем в схеме на рис. 47.

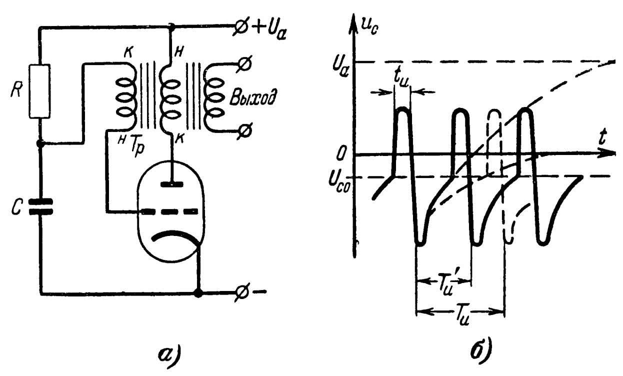


Рис. 48. Блокинг-генератор с „положительной" сеткой.
а — принципиальная схема; *б* — форма нарастания напряжения на сетке лампы.

Так же как и мультивибратор, блокинг-генератор может находиться в «ждущем» режиме. Для этого на сетку лампы от внешнего источника подается постоянное отри-

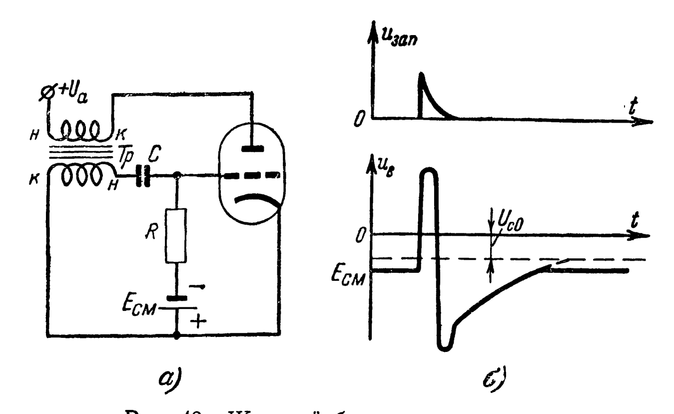


Рис. 49. Ждущий блокинг-генератор.
а — принципиальная схема; *б* — форма напряжения запуска и напряжения на сетке лампы.

цательное напряжение, запирающее лампу (рис. 49). Блокинг-генератор начнет работать только после прихода на сетку его лампы положительного запускающего импульса,

отпирающего лампу. После прекращения действия запускающего импульса и завершения цикла работы блокинг-генератор вновь запирается и остается в ждущем положении до прихода нового запускающего импульса.

Рассмотрим способы запуска такого блокинг-генератора. На рис. 50,*а* запускающий импульс через конденсатор *С* и сеточную обмотку трансформатора *Тр* поступает на сетку лампы. Недостатком такого способа запуска является то, что источник запускающих импульсов все время остается подключенным к сеточной цепи блокинг-гене-

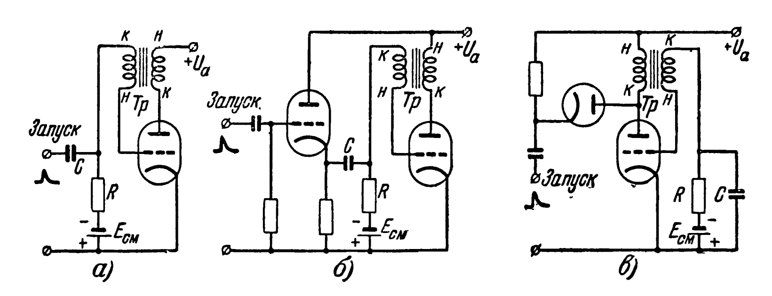


Рис. 50. Способы запуска ждущего блокинг-генератора.
а — запускающий импульс подается на сетку лампы через сеточную обмотку трансформатора; *б* — то же через катодный повторитель; *в* — то же на анод лампы через отсекающий диод.

ратора и оказывает заметное влияние на форму и длительность импульсов блокинг-генератора. Чтобы устранить это влияние, надо подавать запускающие импульсы через катодный повторитель (рис. 50,*б*). Выходное сопротивление катодного повторителя мало, поэтому после запуска левая пластина конденсатора *С* по существу заземлена, и цепь запуска не влияет на процесс формирования выходного импульса блокинг-генератора.

На рис. 50, *в* показан еще один способ запуска блокинг-генератора, при котором запускающий импульс подается через отсекающий диод. Как только лампа блокинг-генератора откроется, скорость нарастания ее анодного тока окажется больше скорости нарастания запускающего напряжения. При этом потенциал на аноде диода вследствие падения напряжения на аноде лампы блокинг-генератора станет меньше потенциала катода, и диод запрется. Таким образом, в этой схеме источник запускающих импульсов уже в самом начале работы блокинг-генератора окажется отключенным.

11. Генераторы импульсов с формирующими линиями

Ранее указывалось, что прямоугольные импульсы при помощи длинной линии можно формировать из перепадов напряжения.

Если линию предварительно зарядить до напряжения U (падающая волна) от источника постоянного напря-

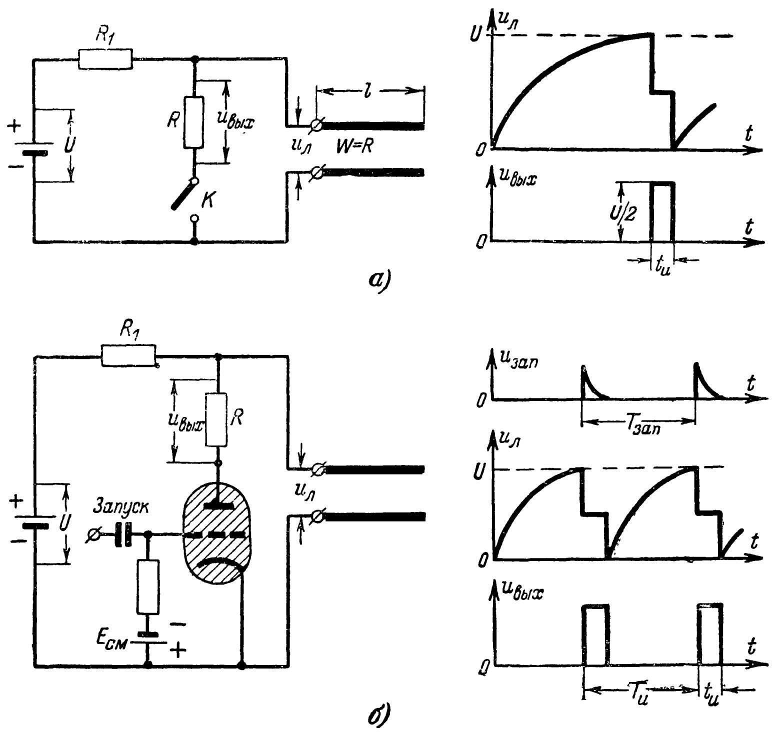


Рис. 51. Принцип получения прямоугольных импульсов при помощи длинной линии.

а — формирование прямоугольного импульса из перепада напряжения; *б* — практическая схема тиратронного генератора импульсов.

жения, а затем замкнуть один ее конец на сопротивление R, равное волновому, оставив другой конец разомкнутым (отключив источник постоянного напряжения), то от замкнутого на сопротивление R конца начнет распространяться отраженная волна напряжения u_0 (рис. 51, *а*). При этом на конце линии

$$u = iR = iW.$$

Поэтому

$$u_n + u_o = (i_n + i_o) W,$$

где

$$u_n = U, \text{ а } i_n = 0 \text{ и } i_o = -\frac{U}{2W}.$$

Тогда

$$u_o = (i_n + i_o) W - U = -\frac{U}{2}.$$

Таким образом, в момент подключения к линии сопротивления R напряжение на конце линии становится равным:

$$U - \frac{U}{2} = \frac{U}{2}.$$

Когда волна $u_o = -\frac{U}{2}$ дойдет до разомкнутого конца линии, она отразится от него с тем же знаком и превратится во вторую падающую волну $u_{n2} = -\frac{U}{2}$. Складываясь с отраженной волной

$$u_o + u_{n2} = -\frac{U}{2} + \left(-\frac{U}{2}\right) = -U,$$

она разряжает линию, заряженную первой падающей волной до напряжения U. Поэтому, когда через промежуток времени $t = 2\frac{l}{v}$ после подключения к линии сопротивления R вторая падающая волна u_{n2} придет к замкнутому на это сопротивление концу, линия окажется полностью разряженной.

Таким образом, на сопротивлении R напряжение скачками изменяется от нуля (когда сопротивление отсоединено от линии) до $\frac{U}{2}$ (когда оно присоединяется к линии) и снова до нуля через промежуток времени $t = 2\frac{l}{v}$ *сек* от момента присоединения, т. е. имеет место прямоугольный импульс с амплитудой $\frac{U}{2}$ и длительностью $t_u = 2\frac{l}{v}$.

Устройство для формирования прямоугольных импульсов при помощи длинной линии состоит из цепи заряда линии от источника напряжения (создание перепада напря-

жения) и цепи разряда линии на сопротивление R, на котором выделяется выходной импульс. Эти цепи должны подключаться к линии попеременно: вначале подключается цепь заряда, которая после заряда линии до напряжения питания отключается, и подключается цепь разряда с сопротивлением R. После разряда линии на сопротивление R эта цепь отключается и вновь подключается цепь заряда и т. д.

В подобных устройствах обычно требуется получить импульсы, длительность которых много меньше интервала между импульсами. Процесс заряда линии может происходить значительно дольше разряда линии, и сопротивление цепи заряда обычно много больше сопротивления цепи разряда линии. Поэтому цепь заряда можно не отсоединять от линии на время разряда, как это показано на рис. 51,*а*.

На рис. 51,*б* представлена практическая схема такого импульсного генератора. В ней ключ K заменен тиратроном. Напряжение на его сетке подобрано так, чтобы тиратрон оставался запертым при полностью заряженной линии. Такое состояние схемы равносильно состоянию предыдущей схемы при разомкнутом ключе K.

В нужный момент на сетку тиратрона поступает положительный запускающий импульс. Он «поджигает» тиратрон. Сопротивление между его анодом и катодом резко уменьшается, т. е. «ключ K» замыкается и происходит формирование выходного импульса.

Следует отметить, что полученные при помощи такого генератора импульсы отличаются большой стабильностью длительности и формы, так как эти параметры зависят в основном только от параметров формирующей линии.

Рассмотренная схема формирует прямоугольный импульс, амплитуда которого вдвое меньше величины напряжения U, и это является существенным недостатком, от которого избавлена схема, изображенная на рис. 52,*а*. В ней заряд линии происходит через индуктивность L, которая вместе с распределенной емкостью линии $C_{рас}=C_{пог}l$ образует колебательный контур ($C_{пог}$ — погонная емкость и l — длина линии). Период собственных колебаний контура

$$T_c = 2\pi \sqrt{LC_{рас}}\,.$$

Через полпериода после начала заряда напряжение $u_л$

на линии почти достигает величины $2U$. В этот момент ключ K замыкается, и происходит разряд линии на сопротивление R. Амплитуда импульса, возникающего на этом сопротивлении, почти равна величине напряжения U. После размыкания ключа происходит следующий заряд линии, потом разряд и т. п.

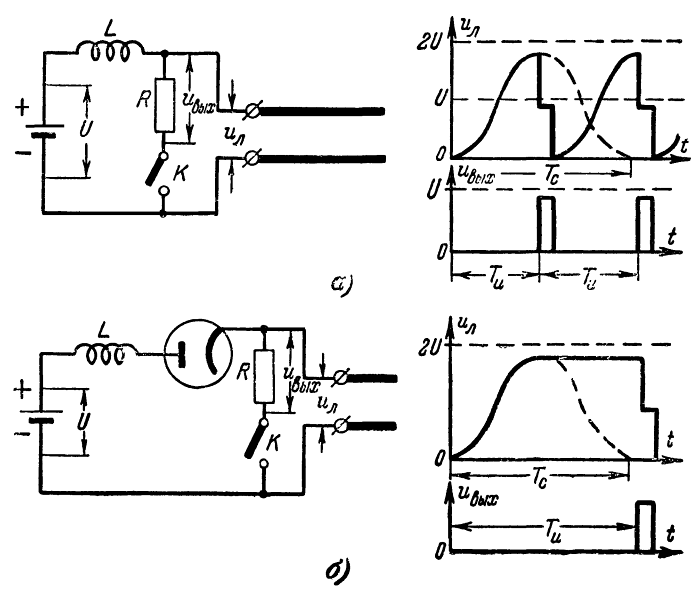


Рис. 52. Формирование прямоугольного импульса из перепада напряжения.

а — заряд линии от источника постоянного напряжения через индуктивность; *б* — то же, но через индуктивность и диод.

Период T_c собственных колебаний контура $LC_{рас}$ должен приблизительно равняться двум интервалам $T_и$ между выходными импульсами или, что то же, интервалу между двумя замыканиями ключа K, т. е. $T_c = 2T_и$.

Поэтому индуктивность L должна быть подобрана соответствующим образом. В противном случае замыкание цепи разряда линии будет происходить либо ранее достижения напряжением на линии максимума, либо уже после этого, когда напряжение уменьшается. В обоих случаях амплитуда выходных импульсов будет меньше возможной. Этот недостаток может быть устранен, если в цепь заряда включить диод (рис. 52,*б*). Тогда во время заряда линии напряжение на катоде диода меньше напряжения на его

аноде, и диод проводит. После достижения напряжением на линии максимального значения диод запирается, и разряд лампы через цепь $R_д — L$ становится невозможным. Индуктивность L в этом случае должна выбираться из условия, чтобы за самый короткий интервал $T_и$ между двумя выходными импульсами линия успела зарядиться:

$$L = \frac{T^2_{мин}}{\pi^2 C_{рас}}.$$

Мы рассмотрели способы формирования прямоугольных импульсов от источника постоянного напряжения.

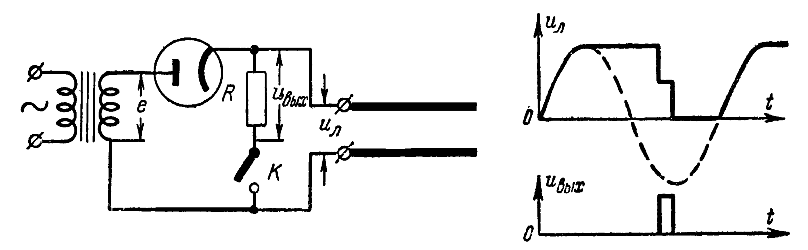


Рис. 53. Формирование прямоугольного импульса при помощи длинной линии и источника переменного напряжения.

Можно использовать и источник переменного тока. Схема такого устройства изображена на рис. 53. Заряд линии происходит через диод до напряжения, лишь незначительно отличающегося от напряжения e на обмотке трансформатора. Как только напряжение на линии сделается максимальным, диод закроется и тем самым сделает невозможным преждевременный разряд линии. Когда ключ K замкнется, произойдет разряд линии и на загрузочном сопротивлении R возникнет прямоугольный импульс. Следует заметить, что разряд линии при помощи ключа K должен быть осуществлен только во время отрицательного полупериода напряжения на трансформаторе, т. е. когда диод закрыт, иначе сопротивление R окажется подключенным к обмотке трансформатора.

12. Синхронизация генераторов и деление частоты следования импульсов

Процесс синхронизации генераторов заключается в том, что их частота поддерживается равной или кратной частоте некоторого внешнего переменного напряжения, кото-

рое называется синхронизирующим. Это напряжение чаще всего бывает синусоидальным или импульсным.

В импульсных устройствах синхронизация встречается очень часто. Так, например, в радиолокационной станции необходимо осуществлять синхронизацию генератора импульсов, излучаемых станцией, с генератором развертки электронно-лучевого индикатора. Без синхронизации невозможно осуществить телевидение, так как момент начала каждой строки и каждого кадра телевизионного растра

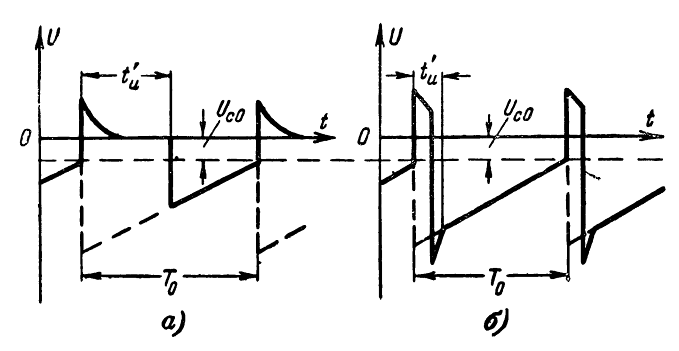


Рис. 54. Условная форма изменения напряжения на сетке лампы импульсного генератора.

а — в мультивибраторе; *б* — в блокинг-генераторе.

в передающей и приемной электронно-лучевых трубках должны быть строго согласованы.

Как известно, в течение одного периода работы T_0 в схеме мультивибратора или блокинг-генератора происходит два скачка (рис. 54). Обычно синхронизируется момент только первого скачка. Второй же скачок, возвращающий устройство в первоначальное состояние, происходит самостоятельно. Поэтому для облегчения рассмотрения процесса синхронизации удобнее считать, что полный цикл работы мультивибратора и блокинг-генератора содержит только один скачок, т. е. напряжение на сетке синхронизируемой лампы всегда отрицательно, больше потенциала запирания и изменяется пилообразно (пунктир на рис. 54). В момент достижения этим напряжением потенциала отсечки лампы происходит скачок. Такую работу схемы можно представить себе, если предположить, что генератор вырабатывает очень короткие импульсы, длительность которых пренебрежимо мала по сравнению с их периодом. Тогда лампа, открывшаяся в результате перво-

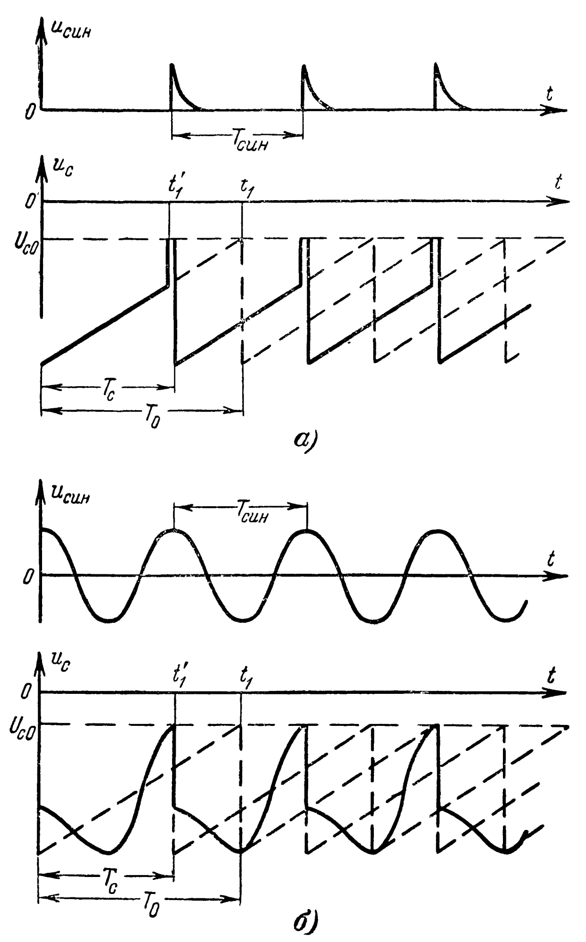


Рис. 55. Процесс синхронизации частоты импульсного генератора.

а — синхронизация импульсами; *б* — синхронизация синусоидальным напряжением.

го скачка, тут же вновь закроется, и напряжение на ее сетке опять станет отрицательным.

Сущность синхронизации состоит в том, чтобы согласовать момент скачка — начала цикла работы генератора — с появлением синхронизирующего напряжения.

Процесс синхронизации рассмотрим на примере генератора, у которого напряжение на сетке меняется, как показано на рис. 55,*а*. Предположим, что в момент t_1', когда

напряжение на сетке лампы еще не достигло потенциала отпирания, в цепь сетки поступает некоторый дополнительный синхронизирующий импульс $u_{син}$ достаточно большой величины, так что напряжение на сетке скачком достигает потенциала отпирания. При этом лампа откроется и, следовательно, новый цикл работы генератора начнется не в момент времени t_1, а в момент t_1', т. е. в момент появления синхронизирующего импульса.

То же самое происходит и в следующий цикл. Таким образом, частота генератора становится равной частоте синхронизирующих импульсов. Эти импульсы необязательно подавать в цепь сетки, их можно подавать и на анод и на катод. Важно, чтобы в момент их появления наступало начало нового цикла работы генератора.

Часто для синхронизации применяют не импульсы, а синусоидальное напряжение. Это вызвано тем, что генераторы синусоидальных колебаний имеют высокую стабильность частоты, в результате чего обеспечивается высокая стабильность частоты синхронизируемых генераторов импульсов. Процесс синхронизации синусоидальным напряжением осуществляется аналогичным образом. Это иллюстрируется диаграммами рис. 55,*б*.

До сих пор мы говорили о синхронизации на основной частоте, когда частота синхронизирующего напряжения равнялась частоте синхронизируемого генератора. Однако можно осуществить синхронизацию колебаниями, частота которых больше или меньше частоты колебаний генератора.

Случай синхронизации колебаниями с вдвое более высокой частотой изображен на рис. 56,*а*. Первый импульс синхронизации не открывает лампы и не приводит к скачку. Срабатывание синхронизируемого генератора происходит при поступлении каждого второго импульса синхронизации. На рис. 56,*б* приведен еще один случай синхронизирования, когда частота синхронизирующих импульсов в 3 раза превышает частоту импульсов на выходе генератора.

Возможность режима синхронизации, при котором частота на выходе генератора в k раз меньше частоты синхронизирующих импульсов на его входе, приводит к выводу, что в данном случае происходит как бы деление частоты входных импульсов. Действительно, если на вход генератора подать импульсы с частотой $f_{вх}$, амплитуда которых выбрана такой, чтобы обеспечить нужный режим синхронизации, то генератор начнет вырабатывать

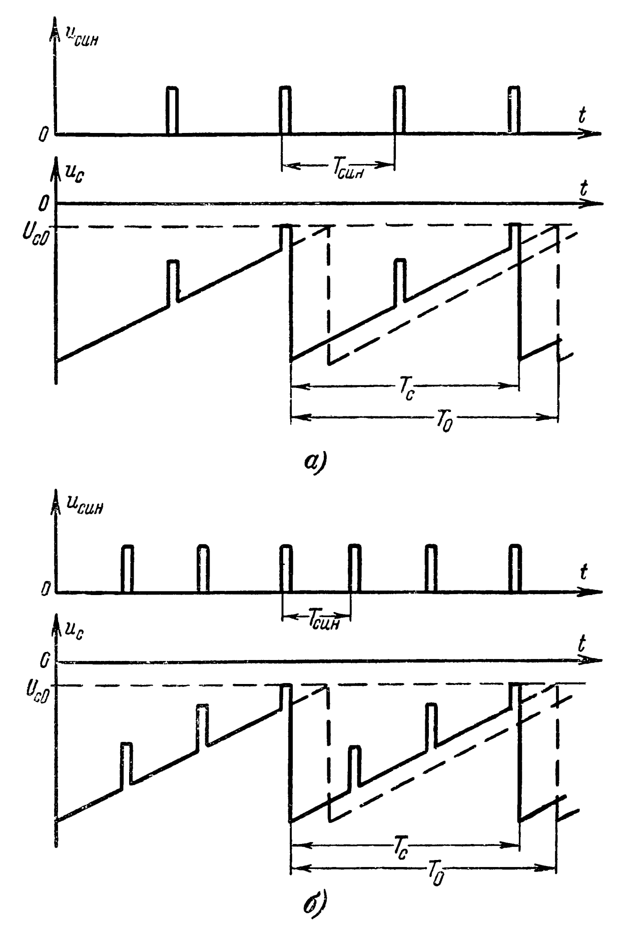


Рис. 56. Синхронизация напряжением, частота которого больше частоты генератора.

а — частота синхронизирующих импульсов в 2 раза выше частоты генератора; *б* — частота синхронизирующих импульсов в 3 раза выше частоты генератора.

импульсы с частотой, в k раз меньшей частоты $f_{вх}$, т. е. произойдет деление входной частоты на коэффициент k.

В качестве делителя частоты можно применить мультивибратор или блокинг-генератор. В мультивибраторе положительные входные импульсы подаются через конденсатор малой емкости на анод одной из ламп, откуда через конденсатор связи поступают на сетку другой лампы. Если

входные импульсы имеют отрицательную полярность, их следует вводить в катодную цепь одной из ламп. Для получения возможно большего коэффициента деления необходимо стабилизировать величину остаточного напряжения на анодах ламп (можно при помощи фиксирующих диодов), стабилизируя тем самым начальный уровень напря-

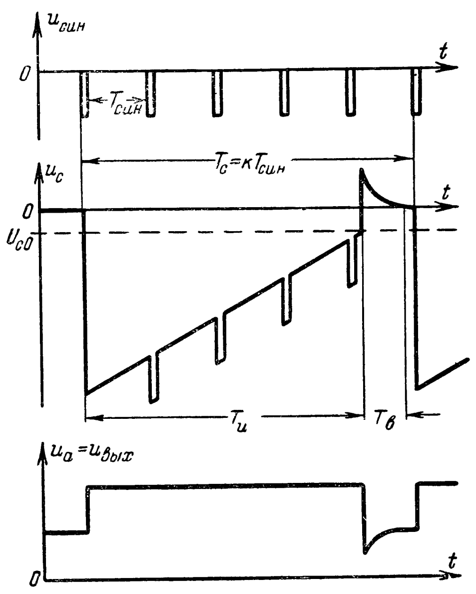


Рис. 57. Деление частоты следования импульсов при помощи ждущего мультивибратора.

жения. Кроме того, надо обеспечить стабильность периода собственных колебаний мультивибратора.

Деление частоты импульсов может быть произведено не только при помощи самовозбуждающегося мультивибратора или блокинг-генератора, но и при помощи ждущего мультивибратора. В этом случае процесс деления частоты входных импульсов отличается от деления способом синхронизации и состоит в том, что запуск ждущего мультивибратора производится не каждым входным импульсом, как это бывает обычно в ждущем режиме, а каждым вторым или третьим, или четвертым и т. д. входным импульсом (рис. 57). Происходит так потому, что после спуска мультивибратора первым отрицательным входным импульсом следующие импульсы уже не оказывают влияния на

его работу (лампа заперта) до тех пор, пока мультивибратор самостоятельно не вернется в исходное положение. Тогда входной k-импульс снова закроет лампу и тем самым снова спустит мультивибратор.

Если надо получить большой коэффициент деления, то следует стабилизировать длительность выходных импульсов мультивибратора, например применением схемы с «положительной» сеткой и диодом, фиксирующим величину остаточного напряжения на аноде лампы мультивибратора, отпертой в исходном состоянии (начальный уровень напряжения).

Описанный способ деления частоты импульсов имеет то преимущество перед делением способом синхронизации, что позволяет получить коэффициент $k_{макс}$ порядка 15—25, в то время как при делении способом синхронизации коэффциент k редко бывает более 5—8.

Если же по условиям работы необходимо получить еще больший коэффициент деления импульсов, то описанные делители соединяются последовательно. Тогда полученные на выходе первого делителя импульсы с частотой, в k раз меньшей входных, являются входными для следующего делителя, на выходе которого частота импульсов уменьшится еще в k раз (по отношению к частоте первых входных импульсов частота уже уменьшилась в k^2 раз) и т. д.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПОЛУЧЕНИЕ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Колебания пилообразной формы используются при измерении временных интервалов между импульсами, для получения растра в электронно-лучевых трубках, для модуляции и демодуляции импульсов и т. п.

Основными параметрами линейно изменяющегося напряжения являются (рис. 58):

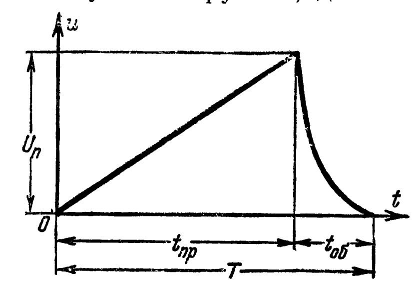


Рис. 58. Параметры линейно изменяющегося напряжения (пилообразной формы).

1) длительность прямого хода t_{np}, в течение которого изменение напряжения должно быть линейным (рабочий участок);

2) длительность обратного хода $t_{об}$, линейность которого обычно не играет роли; важно лишь, чтобы его длительность была много меньше длительности прямого хода;

3) амплитуда пилообразного напряжения U_n;

4) скорость нарастания напряжения во время прямого хода

$$v_{cp} = \frac{U_n}{t_{np}}.$$

13. Принцип получения пилообразного (линейно изменяющегося) напряжения

Пилообразное напряжение можно получить путем медленного заряда конденсатора через омическое сопротивление (прямой ход) и его быстрого разряда (обратный ход — рис. 59,*а*).

Для получения линейного прямого хода ток, заряжающий конденсатор, должен быть постоянным по величине. В действительности же ток при заряде конденсатора через омическое сопротивление, максимальный вначале, экспоненциально изменяется, спадая до нуля (см. гл. 1). Но если использовать только небольшой участок экспоненциальной кривой заряда, то его можно принять за линейный.

Обычно линейность нарастания напряжения u_C на конденсаторе оценивается так называемым к о э ф ф и ц и е н т о м н е л и н е й н о с т и K_{np}, который определяет величину отклонения действительной кривой изменения напряжения на конденсаторе от идеализированной прямой. Чем меньше этот коэффициент, тем лучше линейность.

Из графика на рис. 59,*а* видно, что линейность нарастания напряжения на конденсаторе тем лучше, чем меньше длительность прямого хода t_{np} по сравнению с временем $t_з = 3RC$, необходимым для заряда конденсатора до напряжения источника питания U_a. Коэффициент нелинейности K_{np} может быть выражен формулой

$$K_{np} \approx \frac{t_{np}}{RC}.$$

Если же выразить коэффициент нелинейности не через временные параметры схемы, а как отношение амплитуды пилообразного напряжения U_n к напряжению источника питания U_a, то получим:

$$K_{np}=\frac{U_n}{U_a}.$$

Отсюда

$$U_n=K_{np}U_a.$$

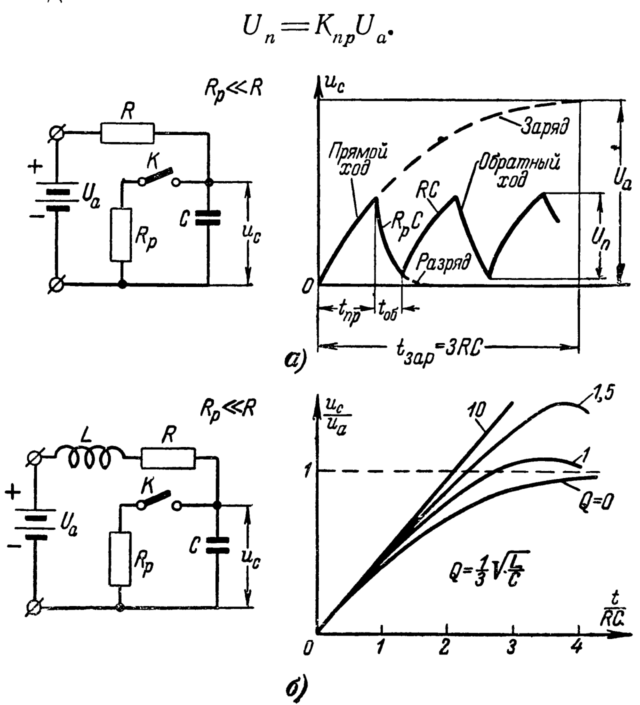


Рис. 59. Получение линейно изменяющегося напряжения путем заряда и разряда конденсатора.

а — заряд конденсатора через сопротивление; *б* — то же через цепь *RL*.

Из последней формулы следует, что если величина коэффициента нелинейности, например, для напряжения, кадровой развертки в телевидении составляет 0,05, то амплитуда пилообразного напряжения, возможная при таком способе заряда конденсатора, составляет всего $U_n = 0{,}05U_a$, т. е. одну двадцатую напряжения питания.

Если заряжать конденсатор через цепь *RL*, то при той

же амплитуде пилообразного напряжения коэффициент нелинейности будет значительно меньше. В этом случае он может быть подсчитан по формуле

$$K_{np} \approx \frac{t_{np}^2}{2LC}.$$

Улучшение линейности нарастания напряжения на конденсаторе при заряде через цепь RL хорошо видно из графика на рис. 59,*б*, где кривая $Q=0$ — форма нарастания напряжения на конденсаторе при $L=0$, т. е. при заряде конденсатора только через сопротивление R. При увеличении добротности контура, образованного R, L и C, линейность улучшается, а значит, увеличивается и возможная амплитуда пилообразного напряжения U_n.

Однако такая схема стабилизации тока заряда конденсатора имеет и существенный недостаток: длительный обратный ход получаемого от нее пилообразного напряжения При замыкании ключа K (разряд конденсатора) замыкается цепь LR (пренебрегая влиянием малого сопротивления R_p). В ней начинает нарастать ток с постоянной времени $\frac{L}{R}$. Поэтому длительность обратного хода не может быть меньше $3\frac{L}{R}$; в противном случае к моменту начала прямого хода ток в катушке не успеет установиться и сделаться равным $\frac{U_a}{R}$. Это значит, что всякое случайное изменение длительности обратного хода вызовет изменение величины начального тока заряда конденсатора, а, следовательно, и изменение линейности прямого хода.

Еще бо́льшую линейность прямого хода можно получить заряжая конденсатор через пентод (рис. 60).

Вначале рассмотрим зависимость между изменением анодного тока i_a лампы и напряжением на управляющей сетке $u_{c\text{-}к}$ для схемы без обратной связи (рис. 60,*а*). Управляющая сетка при этом находится под постоянным отрицательным потенциалом относительно катода, равным $E_{см}$. Анодный ток лампы является зарядным для конденсатора C.

Условимся, что коэффициент нелинейности нарастания

напряжения на конденсаторе C будем определять как коэффициент изменения тока заряда конденсатора

$$K_{пр}=\frac{i_{з.нач}-i_{з.кон}}{i_{з.нач}}=\frac{\Delta i_з}{i_{з.нач}},$$

где $i_{з.нач}$ и $i_{з.кон}$—ток заряда конденсатора соответственно в начале и в конце выбранного участка экспоненциальной кривой заряда.

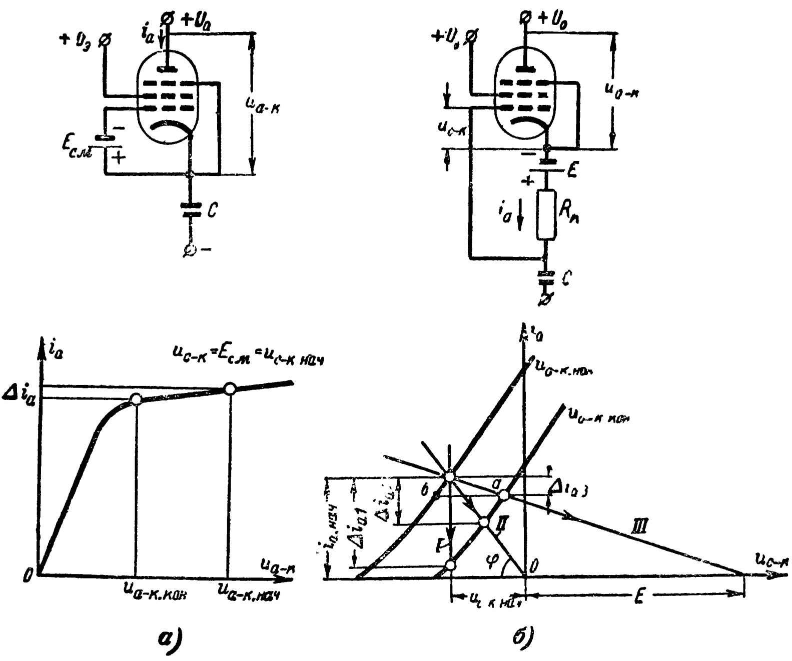


Рис. 60. Заряд конденсатора через пентод.

а — схема без обратной связи; *б* — схема с отрицательной обратной связью.

При коэффициенте нелинейности $K_{пр}=0$ ток заряда конденсатора постоянен и напряжение на конденсаторе нарастает линейно.

Как видно из характеристики на рис. 60,*а* стабилизация тока заряда происходит потому, что изменение напряжения на аноде лампы от $u_{а\text{-}к.\,нач}$ до $u_{а\text{-}к.\,кон}$, вызванное изменением напряжения на конденсаторе C в процессе заряда, незначительно изменяет анодный ток лампы, если

только рабочая точка не достигает линии критического режима.

Однако и это небольшое изменение анодного тока можно еще уменьшить, если ввести в схему отрицательную обратную связь, т. е. связать напряжение на сетке лампы $u_{с\text{-}к}$ с величиной проходящего по сопротивлению $R_к$ тока i_a. Это сделано в схеме на рис. 60,*б*. Здесь же представлена зависимость анодного тока i_a от напряжения на управляющей сетке $u_{с\text{-}к}$.

Когда обратная связь отсутствовала, напряжение на сетке было постоянным и равным $u_{с\text{-}к.нач}$ и не зависело от изменения анодного тока. Поэтому при изменении анодного напряжения рабочая точка характеристики передвигалась по линии *I*. Анодный ток (а следовательно, и зарядный ток конденсатора *С*) при этом изменялся на величину Δi_{a1}.

Сопротивление $R_к$ в схеме с отрицательной обратной связью подбирается так, чтобы первоначальное напряжение смещения, возникающее на этом сопротивлении от прохождения по нему анодного тока, было равно $u_{с\text{-}к.нач}$ (источник напряжения *Е* в схеме в данный момент отсутствует, и сопротивление $R_к$ соединено с катодом).

По мере заряда конденсатора *С* ток заряда, а значит, и анодный ток лампы уменьшаются. Но уменьшение анодного тока вызывает уменьшение напряжения смещения, так как уменьшается падение напряжения на сопротивлении $R_к$. Уменьшение отрицательного напряжения на управляющей сетке лампы вызывает увеличение анодного тока, поэтому падение анодного тока в результате заряда конденсатора замедляется. Рабочая точка характеристики при этом передвигается по линии *II*, и величина падения анодного тока Δi_{a2} от изменения анодного напряжения от $u_{а\text{-}к.нач}$ до $u_{а\text{-}к.кон}$ значительно меньше Δi_{a1}. Величина Δi_{a2} тем меньше, чем больше сопротивление $R_к$, так как наклон линии *II* (угол φ) тем меньше, чем больше $R_к$.

При увеличении сопротивления $R_к$ уменьшается начальное значение тока $i_{а.нач}$ (прямая *II* наклоняется сильнее). Коэффициент же нелинейности, равный:

$$K_{пр} = \frac{\Delta i_a}{i_{а.нач}},$$

остается почти постоянным. Поэтому увеличение $R_к$ рационально до определенного предела, при котором $i_{а.нач}$ равно нужному значению.

Можно еще более уменьшить изменение анодного тока, если в цепь обратной связи ввести источник постоянного напряжения E. В этом случае при изменении напряжения на аноде лампы в результате заряда конденсатора рабочая точка передвигается по линии III. При этом величина изменения анодного тока Δi_{a3} меньше Δi_{a2}. Чем больше напряжение E, тем меньше Δi_{a3}.

Коэффициент нелинейности для последней схемы может быть подсчитан по формуле

$$K_{пр} = \frac{U_п}{\mu E},$$

где μ — коэффициент усиления лампы.

При помощи пентода (его иногда называют *линеаризирующим*) с высоким значением μ, с отрицательной обратной связью и источником напряжения E порядка 150—200 *в* можно получить высокую линейность пилообразного напряжения на конденсаторе C с амплитудой в несколько сотен вольт.

14. Генераторы линейно изменяющегося напряжения

Генераторы линейно изменяющегося напряжения можно разделить на две группы: генераторы линейно нарастающего напряжения, для получения которого используется заряд конденсатора, и генераторы линейно спадающего напряжения, для получения которого используется разряд конденсатора.

Схема *генератора линейно нарастающего напряжения* приведена на рис. 61. Конденсатор C присоединен параллельно электронной лампе, открытой в исходном состоянии. Поэтому конденсатор разряжен, на нем имеется только небольшое остаточное напряжение $u_{а.мин}$.

Если на сетку лампы подать отрицательный прямоугольный импульс, амплитуда которого больше потенциала запирания лампы, то лампа закроется и конденсатор C начнет заряжаться через устройство Cm, стабилизирующее ток заряда. Роль устройства Cm выполняет либо омическое сопротивление R, либо цепь RL, либо линеаризирующий

пентод. При этом на выходе схемы напряжение линейно возрастает (прямой ход).

Как только входной прямоугольный импульс, запирающий лампу, окончится, лампа вновь откроется и начнется разряд конденсатора на ее внутреннее сопротивление R_i (обратный ход). Так как это сопротивление много меньше сопротивления $R_{ст}$ устройства *Ст*, то длительность разряда конденсатора много меньше длительности заряда (рис. 61,*б*).

На рис. 62,*а* представлена практическая схема генератора линейно нарастающего напряжения с линеаризирую-

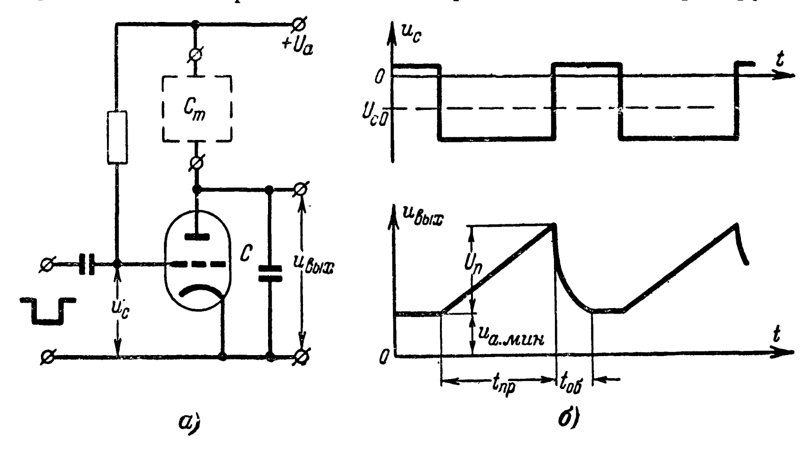


Рис. 61. Генератор линейно нарастающего напряжения.
а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на входе и выходе генератора.

щим пентодом, с отрицательной обратной связью и источником напряжения *Е*. Выходное напряжение снимается с катода лампы $Л_2$. Чтобы сопротивление $R_{внеш}$ внешней цепи не шунтировало по переменному току (через источник питания) лампу $Л_2$ и не влияло, таким образом, на коэффициент нелинейности выходного напряжения, оно должно быть значительно больше внутреннего сопротивления лампы $Л_2$, т. е.

$$R_{внеш} \gg R_i.$$

Для схемы на рис. 62,*а* необходим отдельный выпрямитель напряжения *Е*, ни один из полюсов которого нельзя

заземлить, что очень неудобно. Этот недостаток устранен в схеме на рис. 62,*б*, где роль источника напряжения E выполняет конденсатор C_1 большой емкости. В исходном положении, когда лампа $Л_1$ открыта и конденсатор C разряжен, напряжение на нем, а следовательно, и на сетке лампы $Л_2$ равно остаточному напряжению $u_{а.мин}$ на аноде лампы $Л_1$.

После появления на сетке лампы $Л_1$ управляющего отрицательного импульса происходит заряд конденсатора C

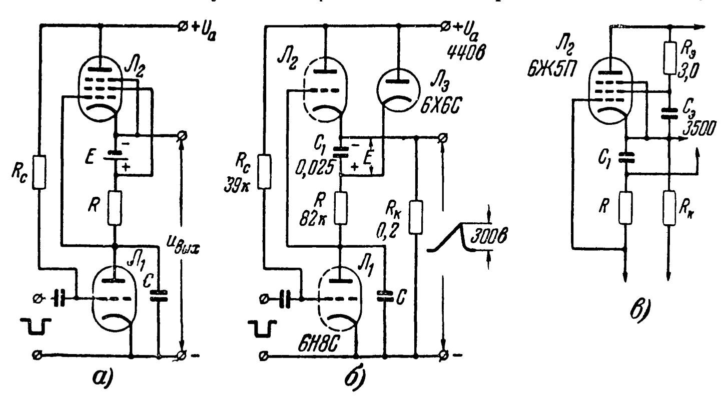


Рис. 62. Генератор линейно нарастающего напряжения с линеаризирующим пентодом.

а — схема с отдельным источником постоянного напряжения E; *б* — схема с заряженным конденсатором C_1 и триодом в качестве линеаризирующей лампы; *в* — то же, но с пентодом в качестве линеаризирующей лампы.

через диод $Л_3$ и одновременно заряд конденсатора C_1 через этот же диод и сопротивление $R_к$. После окончания прямого хода конденсаторы C и C_1 разряжаются через лампу $Л_1$, однако благодаря большой емкости конденсатор C_1 не успевает за время обратного хода заметно разрядиться; напряжение E на нем во время работы близко к разности $U_а - u_{а1мин}$. Поэтому в дальнейшем заряд конденсатора C происходит уже через стабилизирующую цепь лампа $Л_2 - C_1 - R$, подобную рассмотренной ранее, так как при запирании лампы $Л_1$ в начале прямого хода потенциал катода диода $Л_3$ сразу возрастает, он запирается, и заряд конденсатора C происходит за счет разряда конденсатора C_1.

Сопротивление $R_к$ играет здесь роль шунтирующего сопротивления внешней цепи в предыдущей схеме, поэтому необходимо, чтобы $R_к \gg R_i$.

В предыдущем параграфе говорилось, что коэффициент нелинейности при заряде конденсатора через пентод с обратной связью и источником напряжения E тем меньше, чем больше коэффициент усиления μ лампы. Поэтому в качестве лампы $Л_2$ в схеме на рис. 62,*б* желательно применить пентод (рис. 62,*в*). Однако в этом случае сопротивление $R_э$ в цепи экранирующей сетки оказывается по переменному току подключенным параллельно этой лампе. Так как его величина (50—60 *ком*) не может быть взята большей по сравнению с R_i, то линейность нарастания напряжения на конденсаторе C существенно ухудшается.

Описанная схема с конденсатором C_1 вместо источника напряжения E имеет существенный недостаток, заключающийся в нестабильности напряжения E на этом конденсаторе, приводящей к нестабильности скорости нарастания выходного напряжения. Нестабильность напряжения E вызывается непостоянством величины остаточного напряжения на аноде лампы $Л_1$, которая определяет величину напряжения на катоде лампы $Л_2$ во время обратного хода и заряда конденсатора C_1. Величина напряжения E изменяется и при изменении коэффициента заполнения управляющих импульсов, так как изменяется продолжительность заряда и разряда конденсатора C_1.

Приведем некоторые соображения по выбору параметров деталей схемы.

Емкость конденсатора C при большой средней скорости нарастания пилообразного напряжения $v_{cp} = \frac{U_n}{t_{np}}$ следует брать малой: это позволит уменьшить зарядный ток этого конденсатора через лампу $Л_3$. Однако емкость конденсатора C не должна быть меньше паразитных емкостей C_n схемы, обычно составляющих 20—30 *пф*.

Ток заряда этого конденсатора, необходимый для получения нужной длительности прямого хода t_{np}, подсчитывается по формуле

$$t_з = \frac{CU_n}{t_{np}}.$$

Допустимая мощность рассеяния на аноде лампы $Л_3$ должна удовлетворять неравенству

$$P_{аЛ_3} = i_з^2 R_д \frac{t_{об}}{T} \leqslant P_{аЛ_3\,доп},$$

где $R_д$ — внутреннее сопротивление лампы $Л_3$ (обычно равно 250—500 *ом*);

T — период выходного пилообразного напряжения.

К лампе $Л_1$ предъявляются следующие требования: достаточная мощность рассеяния на аноде во время разряда конденсатора C (обратный ход), малое внутреннее сопротивление, что уменьшает длительность обратного хода, и как можно меньший потенциал запирания, так как это позволит управлять генератором импульсами с малой крутизной фронтов. Подходящими являются лампы 6С5С, 6Н8С, 6Н15П и т. п.

Лампа $Л_2$ должна обладать возможно большей крутизной характеристики для уменьшения влияния паразитной емкости, состоящей из выходной емкости генератора и емкости внешней цепи, подключаемой к лампе $Л_3$. Желательно, чтобы величина остаточного напряжения на аноде лампы в конце прямого хода была малой. Это позволит уменьшить необходимое напряжение источника анодного питания. Подходящими в случае использования пентода являются лампы 6Ж4, 6Ж5П и т. п.

При определении величины напряжения U_a источника питания следует учитывать, что максимальное напряжение на катоде, а следовательно, на сетке лампы $Л_2$ в конце прямого хода равно сумме остаточного напряжения на аноде лампы $Л_1$ и амплитуды пилообразного напряжения $U_п$. Поэтому ориентировочно U_a можно принять равным

$$U_a = 1{,}4U_п.$$

Напряжение E на конденсаторе C_1 должно быть порядка напряжения U_a. Сопротивление R, через которое происходит заряд конденсатора C током $i_з$ от напряжения E, определится по формуле

$$R = \frac{E}{i_з}.$$

Чем меньше изменяется напряжение E в процессе работы устройства, тем меньше коэффициент нелинейности выходного напряжения, обусловленный изменением этого напряжения:

$$K'_{пр} = \frac{\Delta E}{E}.$$

Необходимая величина конденсатора C_1, являющегося источником этого напряжения, подсчитывается по формуле

$$C_1 = \frac{t_{пр}}{k'_{пр} R}.$$

Сопротивление $R_к$ берется в несколько сотен тысяч ом, а сопротивление R_c в цепи сетки разрядной лампы порядка нескольких десятков тысяч ом.

Итак, пилообразное напряжение получают путем заряда конденсатора через токостабилизирующее устройство

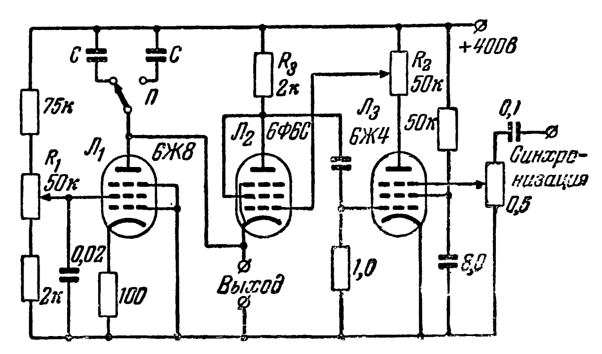


Рис. 63. Схема генератора линейно нарастающего напряжения, объединенная со схемой генератора управляющих импульсов.

R_1 — регулятор частоты; R_2—регулятор амплитуды.

(прямой ход) и быстрого разряда его (обратный ход) через разрядную лампу. Длительность прямого хода определяется длительностью отрицательных управляющих импульсов, подаваемых на сетку разрядной лампы.

Такие управляющие импульсы могут быть получены, например, от несимметричного мультивибратора (см. гл. 3).

В осциллографии часто используют схему генератора линейно нарастающего напряжения, совмещенную с генератором управляющих импульсов (рис. 63). Работает она следующим образом. В исходном положении лампа $Л_3$ открыта, и напряжение на ее аноде минимально. Конденсатор C при этом только начал заряжаться через линеаризирующий пентод $Л_1$. Лампа $Л_2$ заперта, так как ее управляющая сетка по отношению к катоду имеет большой отрицательный потенциал. По мере заряда конденсатора C

катод лампы становится все более отрицательным, наконец, лампа $Л_2$ откроется, и конденсатор начнет через нее разряжаться. Появившийся анодный ток лампы создает на анодном сопротивлении R_3 падение напряжения, которое через конденсатор передается на управляющую сетку лампы $Л_3$ в виде отрицательного импульса. Это вызывает уменьшение ее анодного тока и, следовательно, повышение напряжения на ее аноде и управляющей сетке лампы $Л_2$. Анодный ток лампы $Л_2$ от этого еще более возрастает. Так будет продолжаться до запирания лампы $Л_3$.

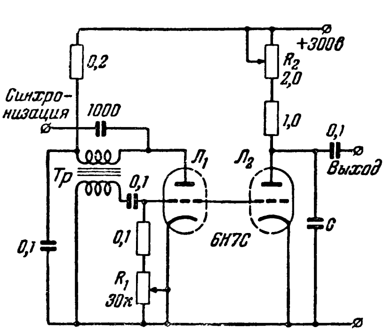


Рис. 64. Применение блокинг-генератора для управления генератором линейно нарастающего напряжения.

R_1 — регулятор частоты; R_2 — регулятор амплитуды.

Когда конденсатор C разрядится, анодный ток лампы $Л_2$ уменьшится и это вызовет увеличение напряжения на управляющей сетке лампы $Л_3$. Лампа $Л_3$ открывается, напряжение на ее аноде уменьшается, а следовательно, уменьшается положительное напряжение на сетке лампы $Л_2$, что приводит к дальнейшему уменьшению ее анодного тока, и, наконец, лампа $Л_2$ запирается. Начинается процесс заряда конденсатора C через пентод $Л_1$ и т. д.

В качестве генератора управляющих импульсов можно использовать и блокинг-генератор. Напряжение на сетке лампы блокинг-генератора все время отрицательно, за исключением коротких положительных импульсов. Поэтому, если это напряжение подать на сетку разрядной лампы (рис. 64), то большую часть времени лампа будет заперта. В это время конденсатор C заряжается, создавая на выходе схемы линейно нарастающее напряжение. В момент короткого положительного импульса на сетке лампы блокинг-генератора разрядная лампа $Л_2$ открывается и конденсатор C разряжается (обратный ход) и т. д. Обычно лампы $Л_1$ и $Л_2$ составляют двойной триод. Схема содержит малое количество деталей, удобна для практического осуществления и получила широкое распространение, особенно в телевидении. Если требования к линейности выходного пилообразного напряжения высоки, то

заряд конденсатора C следует производить не через цепочку из сопротивлений, как это показано в схеме на рис. 64, а через стабилизирующее устройство (цепь RL или через линеаризирующий пентод).

В качестве разрядной лампы в генераторе линейно нарастающего напряжения может быть использован тиратрон (рис. 65). В этой схеме конденсатор C включен между анодом и катодом тиратрона $Л_2$. В цепь катода последовательно включено небольшое сопротивление R_2, падение напряжения на котором создает смещение на сетке тиратрона, определяющее требуемый потенциал зажигания. При помощи регулировки сеточного смещения можно изменять напряжение, до которого заряжается конденсатор C, т. е. можно регулировать амплитуду пилообразного напряжения.

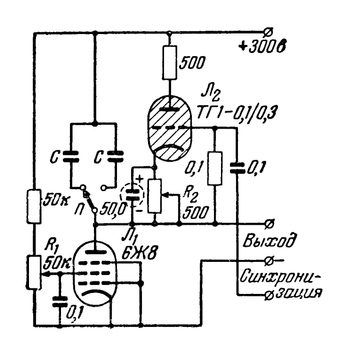


Рис. 65. Генератор линейно нарастающего напряжения с тиратроном.

R_1 — регулятор частоты; R_2 — регулятор амплитуды.

Синхронизация генератора осуществляется путем подачи на сетку тиратрона синхронизирующего напряжения. Это напряжение вызывает разряд конденсатора C через тиратрон в нужный момент, так как оно уменьшает отрицательное напряжение на сетке и приводит к зажиганию тиратрона. Благодаря тому, что изменение напряжения на сетке тиратрона на 1 *в* вызывает изменение потенциала зажигания его на десятки вольт, синхронизация может осуществляться импульсами малой амплитуды.

Длительность прямого хода в тиратронном генераторе, а также в схеме на рис. 63 может изменяться при помощи выбора переключателем одного из конденсаторов C и регулирования сопротивления R_1. При изменении емкости конденсатора C частота будет изменяться скачком, а при регулировании сопротивления R_1—плавно. Последнее объясняется тем, что это сопротивление определяет значение напряжения на экранирующей сетке лампы $Л_1$, а значит, и ее внутреннее сопротивление, которое является зарядным сопротивлением для конденсатора C. Так как длительность прямого хода определяется постоянной времени цепи заряда этого конденсатора, то зависимость частоты пи-

лообразного напряжения от величины сопротивления R_1 вполне понятна.

Перейдем к рассмотрению схем генераторов линейно спадающего напряжения. На рис. 66, *а* приведена типовая схема такого генератора. В исходном

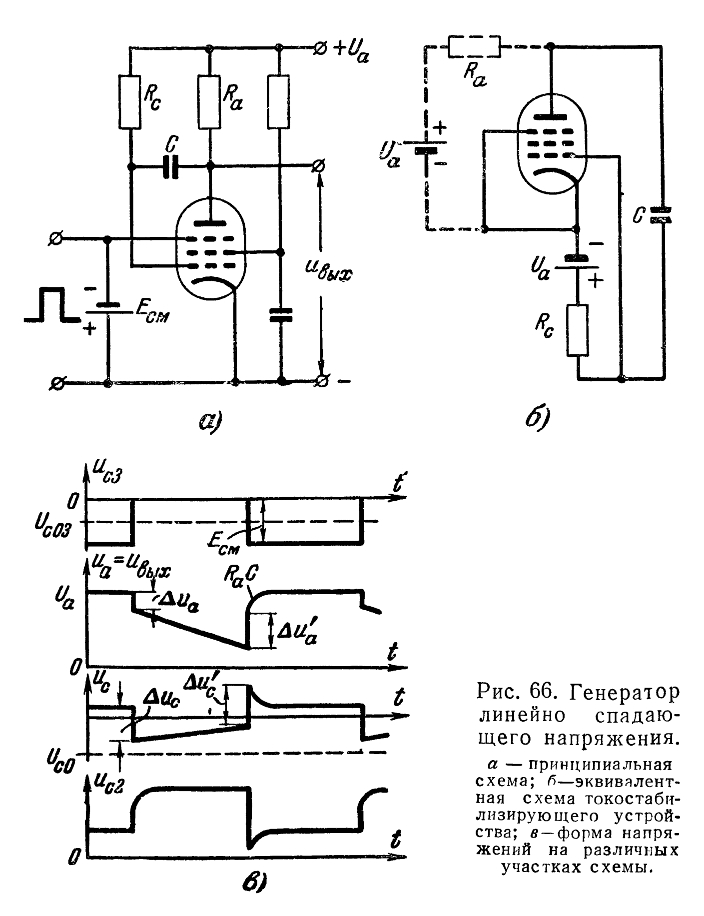


Рис. 66. Генератор линейно спадающего напряжения.

а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема токостабилизирующего устройства; *в* — форма напряжений на различных участках схемы.

положении лампа заперта по анодному току благодаря большому отрицательному напряжению на защитной сетке. Поэтому напряжение на аноде лампы максимально, и конденсатор C заряжен до напряжения U_a через цепь: сопротивление R_a и участок сетка—катод лампы. Напряжение на управляющей сетке при этом несколько больше нуля, так как сетка соединена через большое сопротивление R_c с ис-

точником напряжения U_a. Весь катодный ток лампы протекает по цепи экранирующей сетки.

В таком положении схема остается до прихода на защитную сетку положительного запускающего импульса, амплитуда которого должна быть достаточна для отпирания лампы по этой сетке. Лампа открывается по анодному току, и конденсатор C начинает разряжаться через участок анод — катод лампы, сопротивление источника анодного питания и сопротивление R_c.

Часть схемы на рис. 66, *а*, включающую в себя лампу, конденсатор C и сопротивление R_c, можно представить так, как показано на рис. 66, *б*. Если сравнить полученную схему со схемой на рис. 60, *б*, то нетрудно заметить, что они принципиально не отличаются, т. е. в схеме генератора линейно спадающего напряжения разряд конденсатора C происходит через стабилизирующее устройство, подобное стабилизирующему устройству в генераторе линейно нарастающего напряжения. Роль напряжения E в схеме на рис. 66, *б* выполняет источник анодного напряжения U_a. Прямой ход пилообразного напряжения в этой схеме осуществляется за счет разряда конденсатора C (а не заряда, как в генераторе линейно нарастающего напряжения).

Итак, после подачи на защитную сетку положительного запускающего импульса лампа открывается по анодному току. Напряжение на аноде лампы при этом скачком уменьшается на некоторую величину Δu_a. Начинается линейный разряд конденсатора C. Ток разряда проходит по сопротивлению R_c, создавая на нем падение напряжения, отрицательное по отношению к управляющей сетке лампы. Поэтому напряжение на управляющей сетке скачком уменьшается на величину $\Delta u_c \approx \Delta u_a$ и становится отрицательным. Следует отметить, что величина Δu_c не может быть больше потенциала запирания U_{c0} и запереть лампу, так как в этом случае прекратится анодный ток, а следовательно, и ток разряда конденсатора C, создающий этот скачок напряжения на сетке.

В момент открытия лампы по анодному току ток экранирующей сетки скачком уменьшается, а напряжение на ней возрастает.

Линейный разряд конденсатора C через стабилизирующее устройство аналогичен рассмотренному ранее стабилизированному заряду конденсатора в схеме на рис. 60, *б*.

В схеме генератора линейно спадающего напряжения тоже имеется цепь, шунтирующая лампу и тем самым ухудшающая линейность выходного пилообразного напряжения. На рис. 66, *б* эта цепь показана пунктиром и состоит из сопротивления R_a, через источник напряжения U_a связанного с катодом лампы.

Сопротивление R_a следует брать большим. Однако при увеличении этого сопротивления увеличивается постоянная времени цепи заряда конденсатора C. Процесс заряда конденсатора, который начинается после окончания действия запускающего импульса и запирания лампы по анодному току, определяет длительность обратного хода пилообразного напряжения. Поэтому увеличение постоянной времени этой цепи нежелательно. Кроме того, следующий запуск генератора может быть осуществлен только после окончания заряда конденсатора C и установления напряжения на аноде лампы равным U_a. Только в этом случае начальное напряжение разряда конденсатора будет всегда одинаковым, а, следовательно, будет стабильным выходное пилообразное напряжение. Чтобы это имело место, длительность обратного хода должна в несколько раз превышать постоянную времени цепи R_aC. Поэтому стремление получить высокую линейность пилообразного напряжения за счет увеличения сопротивления R_a приводит к длительному обратному ходу. Обычно сопротивление R_a имеет величину порядка 1 *Мом.*

После окончания действия запускающего импульса и запирания лампы по анодному току, напряжение на ее аноде скачком возрастает на величину $\Delta u'_a$, а затем в соответствии с процессом заряда конденсатора C увеличивается до значения напряжения U_a. Такой же по величине скачок напряжения $\Delta u'_c$ происходит и на управляющей сетке, напряжение на которой становится положительным, а затем в соответствии с зарядом конденсатора спадает до небольшой положительной величины, определяемой сеточным током через сопротивление R_c.

Ток экранирующей сетки в момент запирания лампы по анодному току резко увеличивается, а напряжение на ней падает.

Импульс, подаваемый на защитную сетку, не только запускает генератор линейно спадающего напряжения, но и возвращает схему в исходное положение. Поэтому его длительность должна соответствовать длительности прямого

хода пилообразного напряжения. Однако схема генератора может быть составлена так, что будет самостоятельно возвращаться в исходное положение, а для ее запуска будет достаточно короткого импульса. Схема такого генератора, называемого ф а н т а с т р о н о м, приведена на рис. 67,*а*. Работает она следующим образом.

В исходном положении через катодное сопротивление $R_к$ протекают токи управляющей и экранирующей сеток, и на нем создается падение напряжения, отрицательное по отношению к защитной сетке, величина которого больше потенциала запирания по этой сетке. Поэтому лампа в исходном положении закрыта по анодному току. Катод лампы положителен относительно корпуса. Положительное напряжение на управляющей сетке несколько превышает потенциал катода. Ток экранирующей сетки велик, напряжение на ней минимально. Напряжение же на аноде лампы, наоборот, максимально и равно $U - I_к R_к$. Конденсатор C заряжен до этого напряжения через цепь: сопротивление R_a, участок сетка — катод лампы и сопротивление $R_к$.

Запуск фантастрона осуществляется положительным импульсом, подаваемым на защитную сетку. Амплитуда запускающего импульса должна быть достаточной для отпирания лампы по этой сетке.

Как только лампа откроется по анодному току, напря-

Рис. 67. Фантастрон.
а—принципиальная схема; *б*—форма напряжений на электродах лампы.

жение на аноде упадет и начнется разряд конденсатора C через лампу, сопротивление $R_к$ и сопротивление R_c. Напряжение на управляющей сетке в результате этого уменьшится, а это, в свою очередь, вызовет уменьшение тока экранирующей сетки. От этого уменьшится падение напряжения на сопротивлении $R_к$, отрицательного по отношению к защитной сетке. Анодный ток лампы в результате этого увеличится, а напряжение на управляющей сетке уменьшится, что вызовет дальнейшее падение тока экранирующей сетки и т. д.

Описанный процесс развивается лавинообразно, происходит скачок, в результате которого напряжение на аноде лампы падает. Одновременно уменьшается напряжение на управляющей сетке. Оно становится близким к потенциалу запирания. Ток экранирующей сетки резко уменьшается, и напряжение на ней возрастает. Напряжение же на катоде уменьшается почти до нуля.

Далее начинается процесс линейного разряда конденсатора C, т. е. процесс прямого хода пилообразного напряжения на аноде лампы. По мере разряда конденсатора напряжение на аноде снижается, а ток увеличивается, пока не достигнет максимального значения. После этого управляющая сетка уже не может управлять анодным током. Ток разряда конденсатора C, не стабилизируемый более, начинает резко падать, а это означает, что напряжение на управляющей сетке увеличивается. В результате увеличивается ток экранирующей сетки, который, проходя по сопротивлению $R_к$, создает на нем падение напряжения, отрицательное по отношению к защитной сетке. В результате этого уменьшается ток анода лампы, а значит, увеличивается напряжение на управляющей сетке. Увеличение же напряжения на управляющей сетке означает дальнейшее увеличение тока экранирующей сетки, рост положительного напряжения на катоде, а, следовательно, усиление влияния защитной сетки на анодный ток и т. д.

В результате развивается обратный скачок: анодный ток резко уменьшается, напряжение на аноде скачком увеличивается на величину $\Delta u'_a$, напряжение на управляющей сетке также скачком увеличивается на величину $\Delta u'_c = \Delta u'_a$ и становится положительным относительно катода. Ток экранирующей сетки при этом резко возрастает, а на-

пряжение на ней падает. Напряжение на катоде увеличивается.

После второго скачка начинается последний этап работы фантастрона — заряд конденсатора C до исходного напряжения (обратный ход пилообразного напряжения). Напряжение на аноде лампы при этом возрастает в соответствии с зарядом конденсатора C через сопротивление R_a, участок сетка-катод лампы и сопротивление $R_к$. По мере заряда напряжение на управляющей сетке и катоде лампы спадает до первоначальной величины.

Напряжение на аноде лампы в процессе работы изменяется пилообразно, а напряжение на экранирующей сетке имеет вид прямоугольного импульса. Поэтому фантастрон может служить генератором и импульсного и линейно спадающего напряжения.

Выше говорилось, что для получения хорошей линейности пилообразного напряжения сопротивление R_a следует выбирать большим. Но увеличению сопротивления препятствует возрастание длительности обратного хода. Чтобы избежать этой зависимости, надо построить схему фантастрона так, чтобы заряд конденсатора C происходил не через сопротивление R_a. Это сделано в схеме на рис. 68, где ток заряда конденсатора C проходит через малое нагрузочное сопротивление катодного повторителя на лампе $Л_2$. Постоянная времени этой цепи значительно меньше, чем цепи, в которую входит сопротивление R_a. Поэтому восстановление исходного состояния схемы после обратного скачка происходит значительно быстрее.

Лампа $Л_3$ в этой схеме предназначена для линейного регулирования длительности прямого хода пилообразного напряжения (рис. 68,*б*). Когда лампа $Л_1$ заперта по анодному току, лампа $Л_3$, включенная диодом, открыта, и напряжение на аноде лампы $Л_1$ равно напряжению $u_у$ на катоде лампы $Л_3$. Когда же лампа $Л_1$ отпирается по анодному току и напряжение на ее аноде падает, диод $Л_3$ запирается и не оказывает влияния на дальнейшую работу схемы. Как видно из диаграммы на рис. 68, *б*, длительность пилообразного напряжения зависит от величины $u_у$. Изменяя $u_у$, можно регулировать длительность прямого хода или длительность импульса на экранирующей сетке и катоде лампы $Л_1$.

Кроме того, благодаря использованию лампы $Л_3$ сокращается время восстановления исходного состояния.

Если генератор должен запускаться положительными импульсами, то их следует подавать на защитную сетку лампы $Л_1$, а если отрицательными, то на управляющую сетку, катод или анод лампы (как, например, в схеме

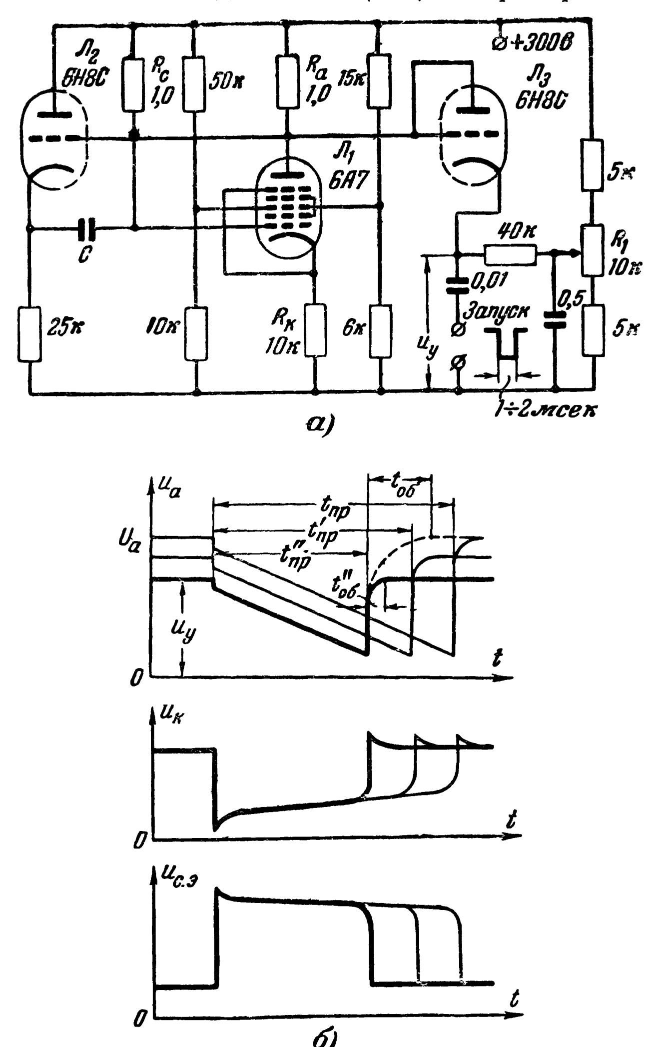


Рис. 68. Фантастрон с катодным повторителем ($Л_2$) для уменьшения времени обратного хода. Регулировка длительности прямого хода осуществляется с помощью сопротивления (R_1).

а—принципиальная схема; *б*—форма напряжений на различных участках схемы.

рис. 68). Амплитуда запускающих импульсов должна быть порядка 30 *в*.

Изменение длительности прямого хода пилообразного напряжения или длительности выходного импульса может быть осуществлено также путем изменения емкости конденсатора C или сопротивления R_c. Чем больше R_cC, тем больше длительность прямого хода.

В качестве лампы $Л_1$ в схеме фантастрона следует выбирать пентод с резкой отсечкой анодного тока по защитной сетке. В этом случае для запуска генератора не потребуются импульсы с большой амплитудой.

Во время ждущего состояния фантастрона, когда ток анода равен нулю, ток экранирующей сетки велик и по величине превосходит максимальный ток анода в момент начала второго скачка. Поэтому экранирующая сетка работает в очень тяжелом тепловом режиме. Это следует учитывать при выборе лампы.

Хорошо работает в схеме фантастрона гептод-преобразователь 6А7. При этом гетеродинная сетка лампы используется в качестве защитной в схеме фантастрона, а защитная сетка лампы соединяется накоротко с катодом.

В заключение следует отметить, что у генераторов линейно спадающего напряжения максимальная скорость изменения напряжения во время прямого хода меньше, чем у генераторов линейно нарастающего напряжения. Происходит это потому, что скорость разряда (как и заряда) конденсатора минимально допустимой емкости определяется величиной тока, проходящего по токостабилизирующей цепи. Увеличение этой скорости может быть достигнуто путем уменьшения сопротивления R_c (или $R_к$ в генераторах линейно нарастающего напряжения), что приводит к резкому увеличению тока управляющей сетки в генераторе линейно спадающего напряжения или анодного тока в генераторе линейно нарастающего напряжения во время обратного хода. Так как допустимая мощность рассеяния на аноде много больше допустимой мощности рассеяния на управляющей сетке, то максимальный ток заряда конденсатора, а следовательно, и максимальная скорость изменения выходного напряжения в генераторе линейно нарастающего напряжения больше максимальной скорости в генераторе линейно спадающего напряжения.

Однако линейность и стабильность выходного напряжения у генераторов линейно спадающего напряжения выше, чем у генераторов линейно нарастающего напряже-

ния, так как в качестве источника напряжения E в них используется источник анодного питания, а не заряженный конденсатор большой емкости, напряжение на котором обычно не отличается стабильностью.

15. Генераторы пилообразного тока

В импульсных устройствах пилообразный ток используется в основном в устройствах отклонения луча электронно-лучевых трубок с электромагнитным отклонением.

Схема простейшего генератора пилообразного тока представлена на рис. 69. В исходном положении лампа за-

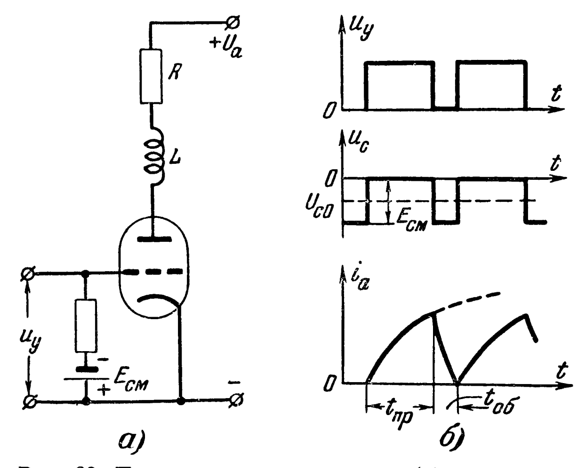


Рис. 69. Принцип получения пилообразного тока.
а—принципиальная схема; *б*—форма управляющего напряжения, напряжения на сетке лампы и тока в анодной цепи лампы.

перта по анодному току благодаря большому отрицательному напряжению на сетке. Предположим, что на сетку лампы подается положительное импульсное напряжение u_y, форма которого показана на рис. 69,*б*. Тогда в момент появления на сетке положительного импульса лампа открывается, и через цепь RL начинает протекать ток. Как было показано в гл. 1, ток через цепь RL после открытия лампы будет нарастать экспоненциально от нуля до максимального значения.

Как только положительный управляющий импульс окончится, напряжение на сетке лампы вновь станет отрицательным. Лампа закроется, и поступление энергии от

источника питания в цепь RL прекратится; ток в цепи при этом упадет. Таким образом, через катушку индуктивности L протекает ток, нарастающий во время действия положительного импульса управляющего напряжения (прямой ход) и спадающий в интервале между этими импульсами (обратный ход), причем спадание тока происходит значительно быстрее, чем нарастание, так как запертая в это время лампа является разрывом цепи.

Если индуктивность L образована отклоняющими катушками электронно-лучевой трубки, то полученный пилообразный ток может быть непосредственно использован для отклонения луча. Импульсное управляющее напряжение нужной формы можно получить от несимметричного мультивибратора.

Однако такой пилообразный ток мало пригоден для создания, например, растра на экране телевизионной трубки. Дело в том, что в телевидении, да и в большинстве других случаев, перемещение луча по экрану электронно-лучевой трубки должно быть равномерным. Для этого пилообразный ток, проходящий по отклоняющим катушкам, должен изменяться во время прямого хода линейно. Полученный же нами пилообразный ток изменяется экспоненциально. Правда, если использовать только небольшой участок кривой изменения тока (как это было сделано при получении пилообразного напряжения путем заряда конденсатора C через сопротивление R), то можно считать, что на этом участке ток изменяется линейно, но это приведет к значительному уменьшению амплитуды пилообразного тока. Поэтому необходимо каким-нибудь способом линеаризовать ток, протекающий по катушке индуктивности L.

В схеме на рис. 69 напряжение на сетке лампы после появления импульса напряжения u_y скачком становилось равным нулю и в процессе прямого хода оставалось постоянным. Поэтому изменение тока через лампу определялось только изменением тока через индуктивность и было экспоненциальным.

Представим теперь, что напряжение на сетке лампы во время прямого хода изменяется так, как показано на рис. 70,*а*. Тогда в соответствии с повышением напряжения на сетке анодный ток лампы будет увеличиваться и нарастание тока через сопротивление R, катушку индуктивности L и лампу будет таким, как показано на рис. 70,*б*, т. е. произойдет линеаризация тока через катушку. Изме-

няя форму напряжения на сетке лампы, можно регулировать линейность пилообразного тока через катушку.

В общем случае для того, чтобы пилообразный ток через катушку был строго линеен, напряжение на сетке лампы должно изменяться не по линейному закону. На практике создание такой формы управляющего напряжения затруднительно. Для управления генератором тока обычно

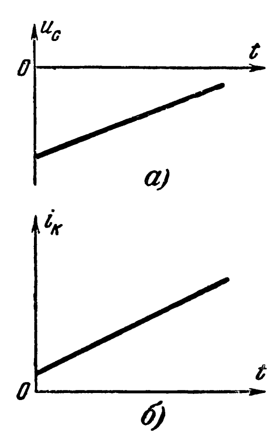


Рис. 70. Получение линейно изменяющегося тока в катушке индуктивности.

а — необходимая форма напряжения на сетке лампы; *б* — форма тока через катушку.

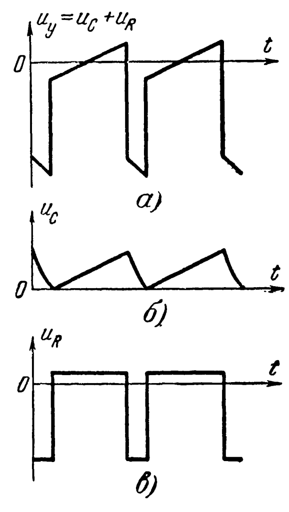


Рис. 71. Формирование управляющего напряжения для получения пилообразного тока.

а—результирующее напряжение; *б*—пилообразная составляющая; *в*—импульсная составляющая.

используют линейно нарастающее напряжение, прерываемое на время обратного хода тока отрицательными импульсами (рис. 71). Нелинейность получаемого при этом пилообразного тока невелика. Такое напряжение можно получить, например, от генератора линейно нарастающего напряжения с блокинг-генератором (рис. 64), если последовательно с конденсатором C включить (между конденсатором и минусом анодного напряжения) сопротивление R.

До сих пор мы не принимали в расчет распределенную емкость катушки индуктивности. А между тем такая емкость в реальной схеме обязательно существует. Будучи подключена параллельно катушке, она образует вместе с ней колебательный контур. Во время прямого хода, когда лампа открыта и ее малое сопротивление участка анод —

катод шунтирует этот колебательный контур (через внутреннее сопротивление источника анодного питания), действие распределенной емкости не сказывается. Однако в момент окончания прямого хода, когда лампа запирается и ее возросшее внутреннее сопротивление уже не может эффективно шунтировать контур, в нем начинается колебательный процесс (рис. 72,*а*). После открывания лампы в начале следующего прямого хода колебания в контуре постепенно затухают, но при этом на экране трубки изображение в начале развертки складывается «гармошкой».

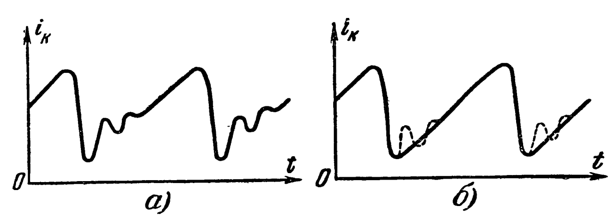


Рис. 72. Ток в отклоняющих катушках.
а — при наличии паразитных колебаний; *б* — при отсутствии паразитных колебаний.

Если внутреннее сопротивление лампы достаточно мало и открытие лампы происходит точно через половину периода собственных колебаний этого контура, то колебания в начале следующего прямого хода сразу же затухнут, и прямой ход будет линейным (рис. 72,*б*). Однако на практике трудно осуществить открывание лампы точно через половину периода собственных колебаний контура. Поэтому применяют другой способ гашения собственных колебаний.

На рис. 73 приведена схема генератора пилообразного тока с шунтирующим диодом. Во время прямого хода, когда лампа $Л_1$ открыта и напряжение на ее аноде мало, напряжение на катоде диода $Л_2$ отрицательно относительно анода. Диод $Л_2$ открыт, и колебательный контур, состоящий из индуктивности L и распределенной емкости C_0 катушки, шунтирован как лампой $Л_1$, так и диодом $Л_2$. Внутреннее сопротивление диода мало и вполне достаточно для эффективного шунтирования контура, поэтому лампа $Л_1$ выбирается из соображений получения необходимой амплитуды пилообразного тока.

Когда лампа $Л_1$ закрывается (начало обратного хода), напряжение на ее аноде резко возрастает. При этом катод диода становится положительным относительно анода и

диод запирается, т. е. перестает шунтировать контур. В контуре начинается колебательный процесс: глубокое спадание тока (рис. 73,*б*). Напряжение на аноде лампы $Л_1$ при этом нарастает.

Через половину периода собственных колебаний контура, когда ток в катушке достигает максимального отрица-

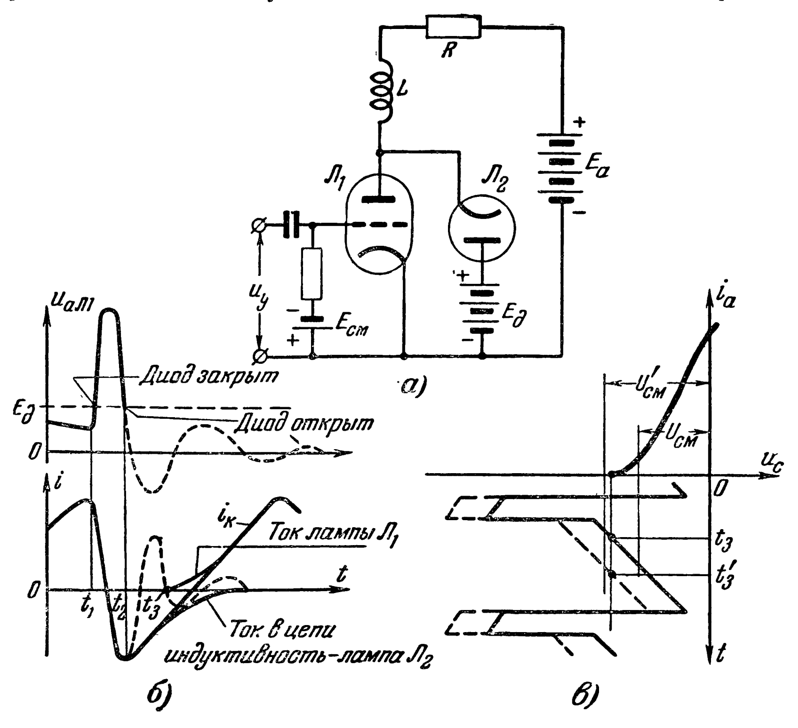


Рис. 73. Генератор пилообразного тока с шунтирующим диодом.
а — принципиальная схема; *б* — иллюстрация работы диода; *в* — диаграмма регулировки момента открытия лампы при помощи изменения начального смещения на сетке.

тельного значения, напряжение на аноде $Л_1$ уменьшается до начального. В результате этого диод открывается и шунтирует контур, срывая в нем колебания. Так как лампа $Л_1$ еще заперта, то ток в катушке индуктивности за счет энергии, накопленной ею во время прямого хода, будет протекать по цепи: индуктивность L — диод $Л_2$. По мере расходования этой энергии ток будет уменьшаться.

Если в момент времени t_3 открыть лампу $Л_1$ (начало нового прямого хода), то ток в катушке будет равен

сумме тока лампы $Л_1$ и тока диода. Подбирая момент открытия лампы $Л_1$, можно сделать нарастание тока в катушке достаточно линейным. Это производится путем регулирования начального смещения на сетке лампы $Л_1$ (рис. 73,*в*).

Описанная схема генератора с шунтирующим диодом имеет еще то преимущество перед схемой генератора на рис. 69, что амплитуда пилообразного тока, протекающего через катушку, много больше максимального размаха анодного тока лампы $Л_1$.

У этой схемы есть еще одна особенность: во время обратного хода всплеск напряжения на аноде лампы $Л_1$ может достигать нескольких тысяч вольт. Обычно эти высоковольтные импульсы используются для питания анода электронно-лучевой трубки.

Рассмотрим практические схемы генераторов пилообразного тока, применяемые в телевидении для развертки электронного луча по строкам и кадрам. Предварительно заметим, что величина отклонения луча на экране трубки пропорциональна произведению числа витков отклоняющей катушки на величину протекающего через нее тока, т. е. одинаковое отклонение можно получить при малом токе, но большом числе витков катушки, и наоборот.

Максимальное число витков катушки определяется допустимой величиной их распределенной емкости, влияние которой тем сильнее, чем больше частота генератора. Поэтому в генераторах кадровой развертки, в которых частота пилообразного тока невелика, число витков отклоняющей катушки может достигать 10—12 тыс. Потребный пилообразный ток таких генераторов составляет всего десятки миллиампер.

В генераторах строчной развертки, где частота велика, число витков отклоняющей катушки не превышает нескольких сотен, и пилообразный ток достигает иногда нескольких ампер. Такое большое потребление тока заставляет обращать особое внимание на повышение к. п. д. схемы. Поэтому в качестве этого генератора обычно используется схема с шунтирующим диодом. Так как импульсы напряжения на аноде лампы такого генератора во время обратного хода достигают нескольких тысяч вольт, отклоняющие катушки во избежание пробоя между витками подключаются к лампе через понижающий трансформатор.

Схема генератора пилообразного тока для кадровой развертки приведена на рис. 74,*а*, а схема генератора пи-

лообразного тока строчной развертки — на рис. 74,*б*. В качестве генераторов управляющего напряжения применены блокинг-генераторы с разрядной лампой и цепью R_3C для формирования пилообразно-импульсного напряжения. Со-

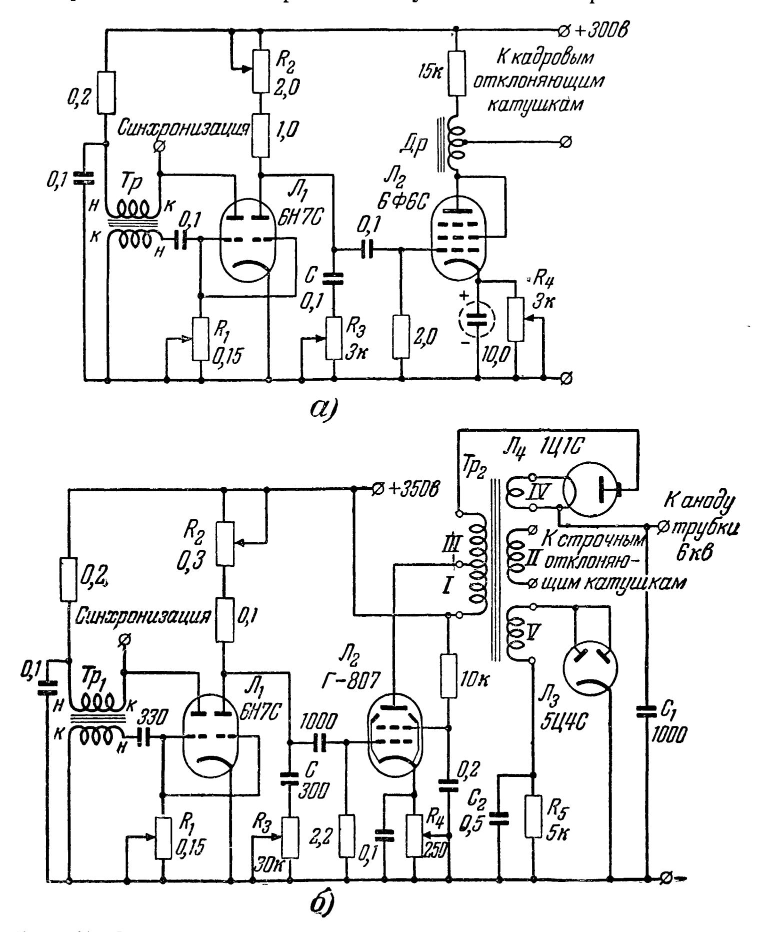


Рис. 74. Схема телевизионных генераторов пилообразного тока.
а — схема генератора частоты кадров; *б* — схема генератора частоты строк.

противление R_1 служит для синхронизации частоты блокинг-генератора с частотой кадровых или строчных импульсов (частота развертки). Размер растра регулируется сопротивлениями R_2. Величина «пьедестала» (импульсная составляющая управляющего напряжения) регулируется

сопротивлениями R_3. Изменяя величину сопротивлений R_4, можно выбрать такой участок характеристики выходной лампы $Л_2$, который позволит получить наилучшую линейность пилообразного тока.

В схеме генератора кадровой развертки цепью формирования пилообразного тока, а одновременно и анодной нагрузкой выходной лампы служат омическое сопротивление и дроссель *Др*, к части витков которого присоединены отклоняющие катушки. В генераторе строчной развертки роль этой цепи выполняет выходной трансформатор, который имеет пять обмоток. Обмотка *I* служит анодной нагрузкой выходной лампы. Обмотка *II* является выходной, к ней подключаются отклоняющие катушки. Обмотка *III* предназначена для повышения напряжения импульсов, возникающих на аноде лампы $Л_2$ во время обратного хода. Эти импульсы затем поступают на анод высоковольтного кенотрона, выпрямляются и подводятся к аноду электронно-лучевой трубки. Для фильтрации выпрямленного напряжения служит высоковольтный конденсатор C_1. Емкость его невелика, так как импульсы следуют с большой частотой. Накал высоковольтного кенотрона питается от обмотки *IV*. В обмотку *V* выходного трансформатора включен шунтирующий диод $Л_3$. Во время прямого хода диод открыт, и ток его проходит по сопротивлению R_5, заряжая конденсатор C_2. Напряжение на этом конденсаторе играет роль напряжения $E_д$ в схеме на рис. 73.

ГЛАВА ПЯТАЯ

СРАВНЕНИЕ ПО АМПЛИТУДЕ

Сравнение амплитуд заключается в определении момента совпадения входного напряжения с некоторым опорным напряжением. Момент совпадения фиксируется появлением импульса на выходе схемы сравнения.

На рис. 75 представлена схема устройства для сравнения амплитуд. В исходном состоянии лампа $Л_1$ открыта, и конденсатор C через цепь R_1, участок сетка — катод лампы $Л_1$ заряжен до значения опорного напряжения $U_{оп}$; потенциал анода диода $Л_2$ равен $+U_{оп}$. Когда напряжение $u_{вх}$ больше $U_{оп}$, диод заперт и напряжение на управляющей сетке лампы $Л_1$ близко к нулю.

Пусть входное напряжение $u_{вх}$ уменьшается. Как толь-

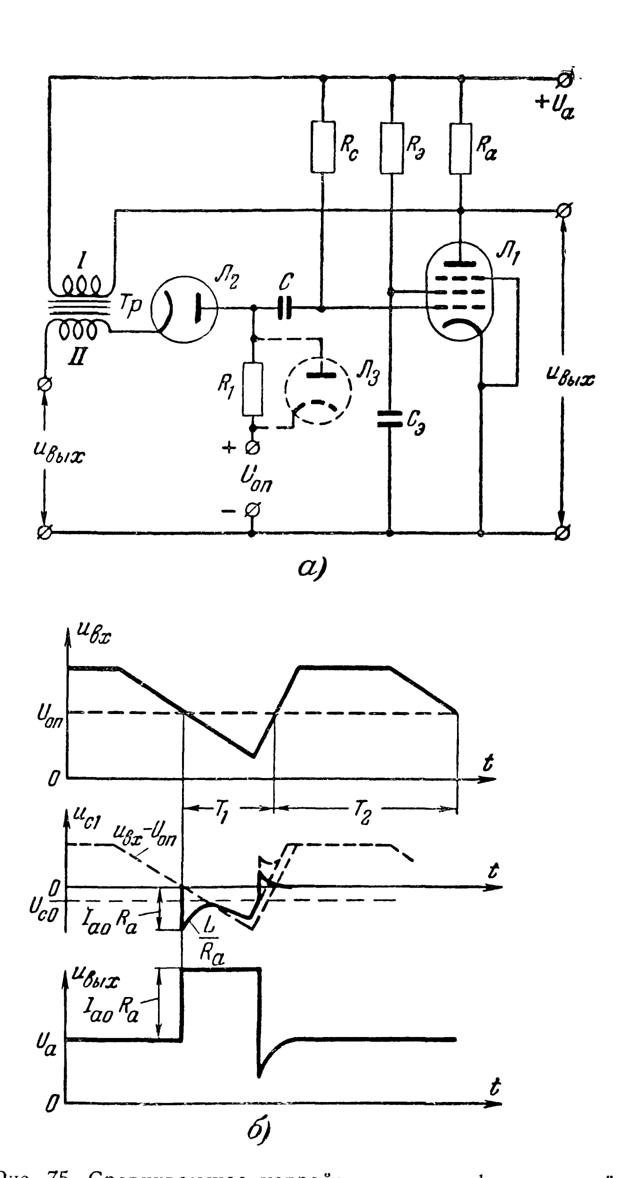


Рис. 75. Сравнивающее устройство с трансформаторной обратной связью.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

ко оно достигнет значения U_{on}, диод $Л_2$ откроется. При этом восстанавливается положительная трансформаторная обратная связь с анода на сетку лампы.

Далее схема действует как блокинг-генератор. Через диод $Л_2$ и конденсатор C уменьшающееся входное напряжение подается на управляющую сетку лампы $Л_1$, что вызывает уменьшение анодного тока, т. е. тока через обмотку I трансформатора. Это уменьшение, увеличенное в K раз (K — коэффициент усиления петли обратной связи), передается на управляющую сетку лампы $Л_1$. В результате лампа $Л_1$ быстро запирается и напряжение на ее аноде скачком увеличивается.

Такой же импульс (с учетом отношения числа витков обмоток трансформатора), но отрицательной полярности возникает на обмотке II трансформатора, а следовательно, и на управляющей сетке лампы $Л_1$. Постоянная времени $\frac{L}{R_a}$ (где L — индуктивность обмотки I трансформатора) должна быть выбрана такой, чтобы, пока этот импульс спадает, напряжение на сетке лампы $Л_1$ уменьшилось до потенциала запирания за счет уменьшения входного напряжения. В противном случае после окончания импульса на сетке лампа $Л_1$ откроется, и в схеме возникнут колебания.

После запирания лампы $Л_1$ напряжение на ее управляющей сетке из-за разряда конденсатора током диода не следует в точности сначала за уменьшением, а потом за нарастанием входного напряжения. Поэтому лампа $Л_1$ отпирается несколько раньше достижения входным напряжением уровня сравнения. В момент отпирания лампы происходит обратный скачок, вызывающий появление отрицательного импульса на аноде лампы. Этот импульс через цепь обратной связи вызывает появление на сетке этой лампы положительного импульса, однако появившийся при этом сеточный ток прекращает увеличение потенциала анода диода $Л_2$. Диод немедленно запирается (так как за счет положительного импульса на обмотке II трансформатока катод диода становится положительным) и разрывает цепь обратной связи. Постоянная времени $\frac{L}{R_a}$ должна быть такой, чтобы держать диод $Л_2$ запертым до тех пор, пока входное напряжение не возрастает настолько, чтобы самостоятельно запереть диод.

Конденсатор C в это время заряжается через сопротивление R_1 и участок сетка-катод лампы $Л_1$ до напряжения U_{on}.

После этого схема возвращается в исходное положение.

Основное требование, предъявляемое к устройствам сравнения, — точность фиксации момента совпадения входного и опорного напряжений. Рассмотрим причины, влияющие на точность фиксации.

Наибольшее влияние оказывает нестабильность характеристики диода $Л_2$ при изменении напряжения накала. Это вызывает более ранее или более позднее открытие диода и тем самым приводит к изменению момента сравнения. Для компенсации смещения характеристики диода $Л_2$ в схему включают дополнительный диод $Л_3$ (пунктиром на рис. 75), составляющий с лампой $Л_2$ двойной диод.

Тогда в исходном положении на аноде диода $Л_3$ действует небольшое напряжение, равное падению напряжения на сопротивлении R_1, вызванное током диода $Л_3$. Поэтому потенциал на аноде диода $Л_2$ меньше $U_{оп}$ на величину этого напряжения. Так как диоды $Л_2$ и $Л_3$ представляют собой одну лампу, то изменение напряжения накала смещает их характеристики примерно на одинаковую величину. Поэтому, если раньше увеличение напряжения накала вызывало более раннее открытие диода $Л_2$, то теперь благодаря той же причине увеличится ток через диод $Л_3$ и падение напряжения на сопротивлении R_1. Следовательно, потенциал на аноде диода $Л_2$ уменьшится и отпирание его несколько запоздает. Аналогичное влияние имеет место и при уменьшении напряжения накала.

Включение компенсирующего диода $Л_3$ снижает также и величину «дрейфа» уровня сравнения, вызываемого старением диода $Л_2$. Так как диоды $Л_2$ и $Л_3$ стареют одновременно, их характеристики смещаются приблизительно на одну и ту же величину, что стабилизирует уровень сравнения.

Нестабильность уровня сравнения может иметь место и при слишком большой постоянной времени R_1C заряда конденсатора C по сравнению с длительностью интервала T_2, в течение которого диод $Л_2$ заперт. При этом конденсатор C к моменту сравнения может не успеть полностью зарядиться, и ток через него будет создавать на сопротивлении R_1 падение напряжения, смещающее уровень сравнения. Поэтому при изменении параметров выходного напряжения (интервалов T_1 и T_2) будет изменяться и уровень сравнения. Если же ток заряда конденсатора C к моменту сравнения будет велик, то значительное падение

напряжение на сопротивлении R_1 может запереть диод $Л_3$ и его компенсирующее влияние прекратится. Поэтому емкость конденсатора C должна быть, по возможности, малой, однако все же много большей емкости $C_{вх}$, состоящей из входной емкости лампы $Л_1$ и емкости монтажа. Практически $C=100—300$ *пф*.

При выборе величины сопротивления R_1 следует учитывать, что через емкость $C_{а\text{-}к}$ между анодом и катодом диода $Л_2$ еще до момента сравнения проходит ток, величина которого тем больше, чем больше скорость изменения входного напряжения. Наличие этого тока приводит к увеличению падения напряжения на параллельной цепочке сопротивлений R_1 и $R_{д3}$ ($R_{д3}$ — внутреннее сопротивление лампы $Л_3$), что вызывает уменьшение потенциала анода диода $Л_2$, а значит, запаздывание момента сравнения. Чтобы уменьшить это запаздывание, эквивалентное сопротивление цепи R_1— $R_{д3}$ должно быть небольшим. Сопротивление $R_{д3}$ будет небольшим в том случае, если рабочая точка диода находится в области больших токов через диод, а для этого величина сопротивления R_1 должна быть также небольшой (порядка 10—100 *ком*).

Сопротивление R_a должно выбираться из соображений получения нужной постоянной времени $\frac{L}{R_a}$, а также из условия получения нужной амплитуды выходных импульсов.

В сравнивающих устройствах с трансформаторной связью необходимо обеспечить запирание лампы $Л_1$ и диода $Л_2$ в течение времени, пока входное напряжение не будет в силах само это сделать. При малой скорости изменения входного напряжения величина L индуктивности обмотки трансформатора получается поэтому весьма значительной (единицы генри). Это приводит к очень большим значениям распределенной емкости и индуктивности рассеяния, т. е. к удлинению фронта выходного импульса. Поэтому следует стремиться работать с большими скоростями изменения входного напряжения.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРЕМЕННАЯ ЗАДЕРЖКА ИМПУЛЬСОВ

Необходимость в переменной задержке импульсов встречается очень часто. В радиолокации и радионавигации переменная задержка используется для получения

масштабов измерений времени, в импульсной радиосвязи с ее помощью осуществляется выбор нужного канала, в измерительной технике устройства переменной задержки импульсов позволяют измерять малые промежутки времени и т. д.

Существует несколько способов получения переменной задержки импульсов, основанных на разных принципах. Мы рассмотрим некоторые из наиболее употребительных.

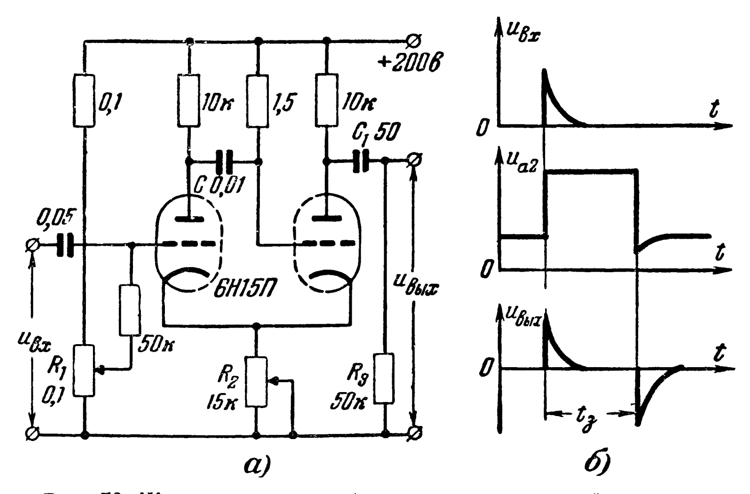


Рис. 76. Ждущий мультивибратор для переменной задержки импульсов.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

В качестве простейшего устройства переменной задержки импульсов можно использовать ждущий мультивибратор (рис. 76). Входные положительные импульсы поступают на сетку левого триода и запускают мультивибратор. При этом на аноде правого триода возникает положительный прямоугольный импульс, длительность которого определяет длительность задержки (рис. 76,*б*). Регулируется она изменением емкости конденсатора C (диапазон времени задержки) и потенциометром R_1, а также сопротивлением R_2 (плавная регулировка времени задержки).

Полученный прямоугольный импульс пропускается через дифференцирующую цепь C_1R_3, на выходе которой появляются остроконечные импульсы положительной и отрицательной полярности, соответствующие фронту и спаду прямоугольного импульса. Так как нас интересует только

импульс, соответствующий спаду прямоугольного импульса и задержанный относительно входного на время $t_з$, то эти остроконечные импульсы следует пропустить через ограничитель сверху с нулевым уровнем ограничения.

Недостатком такого устройства переменной задержки является то, что ждущий мультивибратор не обладает строгой линейной зависимостью длительности выходного импульса (а значит, и времени задержки) от угла поворота движка сопротивлений R_1 и R_2. Поэтому отсчет времени задержки непосредственно по лимбу этих сопротивлений дает погрешность порядка нескольких процентов от времени задержки. Стабильность времени задержки зависит от постоянства анодного напряжения, источник которого желательно стабилизировать.

Более совершенным устройством переменной задержки импульсов является фантастрон (рис. 68), время задержки в котором определяется длительностью импульса, снимаемого с экранирующей сетки или катода лампы. Регулируется она потенциометром R_1, причем длительность выходного импульса линейно зависит от изменения управляющего напряжения $u_у$. Поэтому, если потенциометр R_1 линеен, т. е. изменение его сопротивления пропорционально углу поворота движка, то по лимбу этого потенциометра можно с достаточной точностью отсчитывать время задержки.

Потенциометр этот изготавливается очень тщательно. Обычно он навивается из тонкой проволоки с минимальным температурным коэффициентом. В большинстве случаев общая временнáя погрешность не превышает 0,5—1,0% от времени задержки.

Схема устройства переменной точной задержки импульсов приведена на рис. 77. Устройство работает следующим образом.

Входной импульс запускает ждущий мультивибратор на двойном триоде $Л_1Л_2$, который «расширяет» входной импульс, превращая его в прямоугольный. Длительность этого прямоугольного импульса определяется наибольшим временем задержки.

Прямоугольный импульс мультивибратора поступает на защитную сетку лампы $Л_4$ и запускает генератор линейно спадающего напряжения. С анода лампы $Л_4$ это напряжение подается на сравнивающее устройство (лампы $Л_6$, $Л_7$) с трансформаторной обратной связью.

В момент сравнения диод $Л_6$ открывается и в анодной

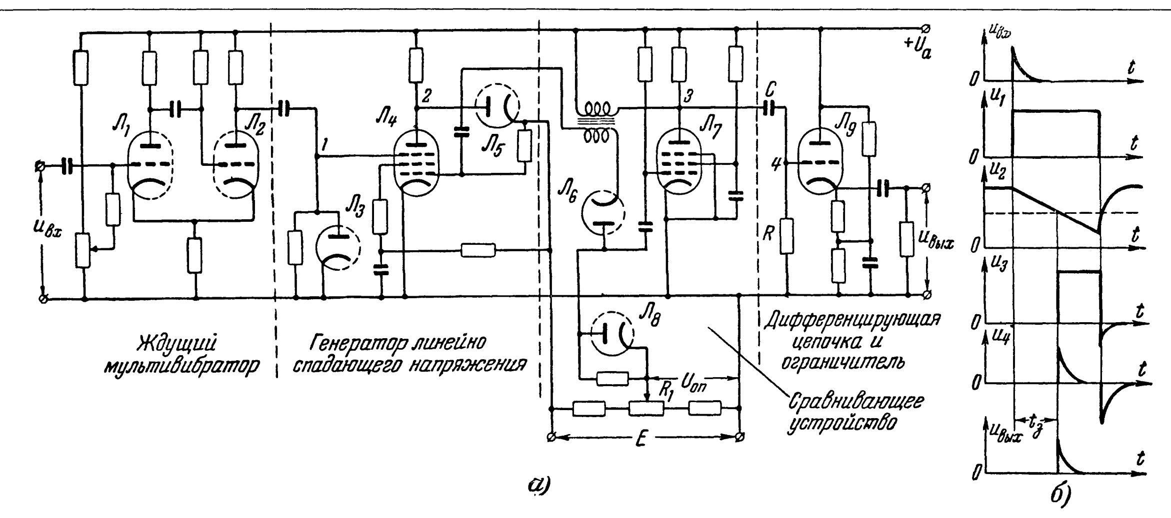


Рис. 77. Устройство для получения переменной задержки импульсов, работающее по принципу сравнения напряжений.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

цепи лампы $Л_7$ образуется импульс, фронт которого задержан относительно входного импульса на время $t_з$, зависящее от напряжения $U_{оп}$ и определяемое по лимбу потенциометра R_1, регулирующего уровень этого напряжения.

После дифференцирования (цепь RC) этот прямоугольный импульс превращается в два остроконечных импульса положительной и отрицательной полярности. Они подаются на ограничитель, с выхода которого снимается положительный остроконечный импульс, соответствующий фронту прямоугольного импульса сравнивающего устройства и задержанный относительно выходного импульса на время $t_з$.

Чтобы повысить точность отсчета времени задержки $t_з$, в схеме при помощи диода $Л_5$ осуществлена фиксация начального уровня линейно спадающего напряжения, а постоянное напряжение E в схеме генератора линейно спадающего напряжения и опорное напряжение $U_{оп}$ снимаются со стабилизированного выпрямителя; от него же питается и экранирующая сетка лампы $Л_4$. Диод $Л_8$ включен для компенсации сдвига характеристики диода $Л_6$ от старения и изменения напряжения накала.

Описываемое устройство позволяет получить задержку в пределах от десятых долей микросекунды до 1 000 *мксек* с точностью задержки порядка 10^{-3} (от времени задержки).

Получение более длительных задержек, порядка нескольких тысяч микросекунд, при помощи такого устройства затруднительно, так как максимальная величина задержки может быть увеличена либо за счет увеличения амплитуды линейно спадающего напряжения, либо за счет уменьшения скорости $v_{ср}$ изменения этого напряжения. Однако амплитуда этого напряжения не может быть более 250—300 *в* (иначе потребуется очень высокое напряжение U_a), а уменьшение скорости $v_{ср}$ приводит к неточности срабатывания сравнивающего устройства. Поэтому, если требуется получить задержку порядка тысяч микросекунд, то включают последовательно несколько задерживающих устройств, например фантастронов, или применяют устройство, блок-схема которого приведена на рис. 78.

Входной импульс $U_{вх}$ запускает ждущий мультивибратор, вырабатывающий прямоугольный импульс U_1, длительность которого равна максимальной задержке $t_{з.макс}$. Этот

импульс возбуждает генератор прямоугольных импульсов с контуром ударного возбуждения (см. § 3), который генерирует серию импульсов U_2 с определенным интервалом T_0 между ними. Кроме того, прямоугольный импульс U_1

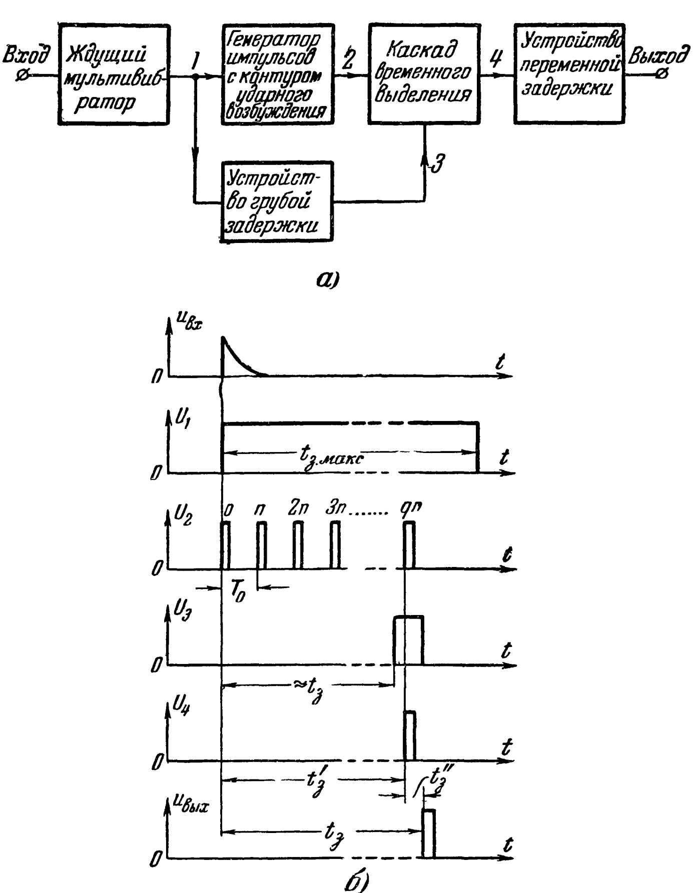


Рис. 78. Принцип получения длительной задержки импульсов.
а — блок-схема установки; *б* — диаграммы напряжений.

мультивибратора одновременно спускает устройство грубой задержки, которое генерирует импульс U_3, задержанный на приблизительно нужное время задержки, но совпадающий во времени с одним из импульсов U_2, причем ширина импульса U_3 больше ширины импульса U_2. В качестве генератора грубой задержки может быть применено любое

устройство так как к точности задержки не предъявляется особых требований.

Импульсы U_2 и U_3 поступают в устройство временного выделения. Подробно такие устройства будут рассмотрены в гл. 8. Сущность работы устройства временного выделения заключается в том, что через него может пройти только тот импульс U_2, который совпадает во времени с импульсом грубой задержки U_3. Поэтому на выходе устройства появится импульс U_4, задержанный относительно опорного импульса на время $t_з' = T_0 qn$.

Теперь этот импульс играет роль входного импульса в устройстве точной задержки, подобном описанному выше, на выходе которого появляется второй задержанный импульс $u_{вых}$, причем время его задержки выбирается таким, чтобы сумма задержки $t_з'$ и $t_з''$ равнялась нужной задержке $t_з$, т. е. $t_з' + t_з'' = t_з$.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

МОДУЛЯЦИЯ И ДЕМОДУЛЯЦИЯ ИМПУЛЬСОВ

Модуляцией импульсов называется процесс изменения во времени какого-либо параметра серии импульсов (амплитуды, фазы или длительности) в соответствии с модулирующим сигналом.

Демодуляция является процессом, обратным модуляции, и заключается в получении сигнала, изменяющегося по закону модуляции данной серии импульсов.

Временные диаграммы модуляции импульсов по амплитуде, длительности и по фазе приведены на рис. 79.

При модуляции импульсов по амплитуде (рис. 79,*а*) амплитуда импульсов пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала.

Модуляция импульсов по длительности (широтно-импульсная модуляция) заключается в том, что длительность импульсов изменяется в соответствии с модулирующим сигналом, причем если модулирующий сигнал положителен, то длительность импульсов больше начальной длительности $t_{и.нач}$, а если модулирующий сигнал отрицателен, то меньше начальной.

Изменение длительности импульсов может происходить, например, так, как показано на диаграмме на рис. 79, *б*.

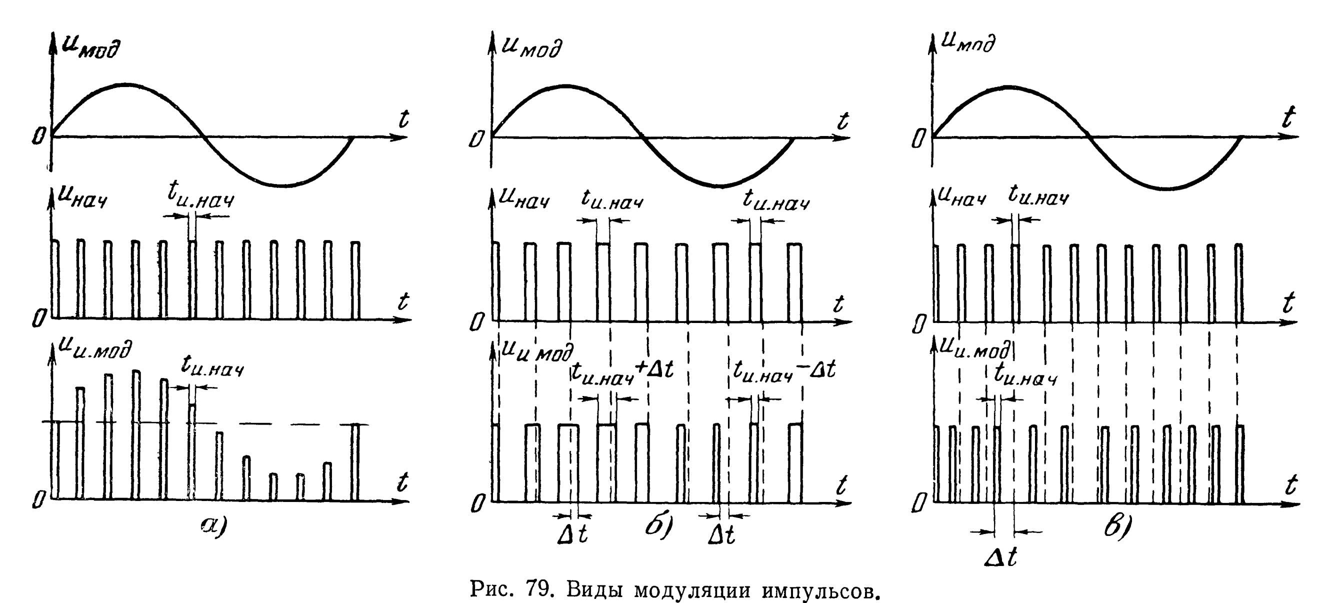


Рис. 79. Виды модуляции импульсов.

а — модуляция по амплитуде; *б* — модуляция по длительности (широтно-импульсная модуляция); *в* — модуляция по фазе.

Здесь фронт модулированных импульсов совпадает с фронтом немодулированных импульсов, а изменение длительности происходит за счет перемещения спада импульсов. При положительном модулирующем сигнале $t_{и.мод} = t_{и.нач} + \Delta t$, причем Δt тем больше, чем больше мгновенное значение модулирующего напряжения. При отрицательном модулирующем сигнала $t_{и.мод} = t_{и.нач} - \Delta t$.

Помимо такого способа модуляции по длительности, возможны и другие, например, когда изменяется положение фронта импульсов, а положение спада остается неизменным, а также одновременное изменение положения фронта и спада импульсов.

Амплитуда импульсов во время модуляции по длительности остается неизменной.

Модуляция импульсов по фазе (рис. 79,*в*), которую иногда называют временной импульсной модуляцией, состоит в том, что импульсы смещаются вперед от их среднего (немодулированного) положения во времени при положительном модулирующем сигнале и назад — при отрицательном модулирующем сигнале, причем это смещение тем больше, чем больше мгновенное значение модулирующего сигнала.

Модуляция и демодуляция импульсов встречаются в импульсных устройствах многоканальной связи, в телевидении, в устройствах телеуправления и т. д.

16. Модуляция и демодуляция импульсов по амплитуде

Модуляторы. Схема амплитудного импульсного модулятора приведена на рис. 80. Модулятор представляет собой анодный ограничитель, причем на экранирующую сетку пентода подано модулирующее напряжение, а на управляющую — серию импульсов. Так как анодный ток пентода почти линейно зависит от напряжения на экранирующей сетке, то на выходе импульсы оказываются модулированными по амплитуде.

Другая схема модулятора приведена на рис. 81. В ней модулирующее напряжение подается на сетку катодного повторителя на правом триоде $Л_2$. Этим самым оно вводится в цепь катода модулятора, запирая левый триод при отсутствии немодулированных импульсов на его сетке. Когда на сетке лампы $Л_1$ появляется положительное импульсное напряжение $u_{нач}$, в анодной цепи появляется ток,

величина которого зависит от модулирующего напряжения $u_{мод}$, являющегося напряжением смещения этой лампы.

Демодуляторы. Выделение напряжения модуляции из повторяющихся амплитудно-модулированных импульсов может быть произведено при помощи обычного фильтра нижних частот. Как известно, такой фильтр пропускает только те частоты, которые лежат в полосе его прозрачности, т. е. от нуля до некоторой граничной частоты. Если параметры фильтра выбрать соответствующим

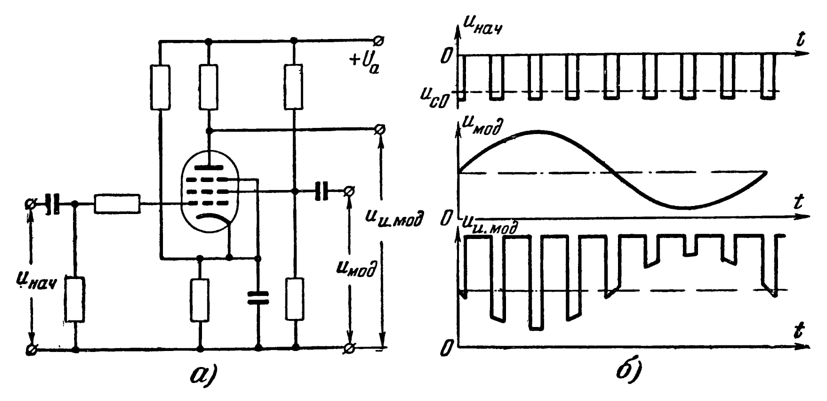


Рис. 80. Анодный ограничитель по минимуму как модулятор импульсов на амплитуде.

а — принципиальная схема; *б* — форма модулирующего напряжения, а также напряжений на входе и выходе модулятора.

образом, то через фильтр пройдет лишь низкая частота модуляции, в то время как высокочастотные составляющие импульсного напряжения будут задержаны. Однако амплитуда низкой частоты, выделенная фильтром, будет невелика, примерно во столько раз меньше амплитуды модулированных импульсов, поданных на фильтр, во сколько длительность импульса меньше периода повторения импульсов.

Лучшие результаты будут получены, если перед фильтром включить пиковый детектор, схема которого представлена на рис. 82. Во время положительного импульса на входе такого детектора диод открыт, и конденсатор C через малое сопротивление $R_д$ успевает зарядиться до напряжения, равного амплитуде импульса. Во время паузы между импульсами конденсатор несколько разряжается через большое сопротивление R. Следующий импульс снова подзарядит конденсатор до своей амплитуды и т. д. Фильтр нижних частот, стоящий за пиковым детектором,

отделяет низкочастотный модулирующий сигнал от высокочастотной импульсной составляющей. Амплитуда полезного сигнала в этом случае будет значительно больше, чем в предыдущем.

Для нормальной работы демодулятора величины R и C должны быть выбраны так, чтобы во время паузы между

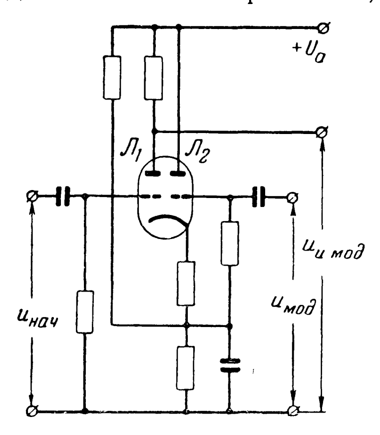


Рис. 81. Модулятор импульсов по амплитуде с большим входным сопротивлением для модулирующего напряжения.

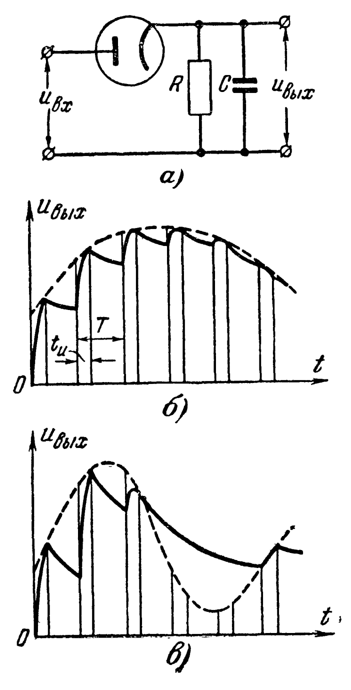


Рис. 82. Пиковый детектор для демодуляции импульсов, модулированных по амплитуде.

а — схема; *б* — форма напряжения на выходе; *в* — то же в случае неправильного подбора постоянной времени фильтра.

импульсами скорость разряда конденсатора C через сопротивление R не была меньше максимальной скорости низкочастотной огибающей импульсов, иначе некоторые из импульсов не смогут открыть диод, и возникнут искажения (рис. 82,*в*).

17. Модуляция и демодуляция импульсов по длительности

Модуляторы. Модуляторами импульсов по длительности могут служить рассмотренные ранее устройства переменной задержки импульсов. Действительно, если на вход такого устройства подать немодулированные по длительности импульсы, а опорное напряжение заставить изменяться в соответствии с формой модулирующего сигнала,

то на выходе устройства появятся модулированные по длительности импульсы.

В качестве модулятора импульсов по длительности может быть использован, например, фантастрон (рис. 68). Модулирующее напряжение следует подавать через катодный повторитель и диод $Л_3$ на анод лампы $Л_1$. Это вызовет изменение величины напряжения u_y, а значит, и длительности импульсов на экранирующей сетке лампы, т. е. произойдет модуляция этих импульсов по длительности.

Демодуляторы. Как и при амплитудно-импульсной модуляции, в качестве демодулятора может применяться фильтр нижных частот, который в этом случае пропускает низкую частоту изменения длительности импульсов, но задерживает высокочастотные импульсные составляющие. Однако амплитуда выделяемой фильтром низкочастотной составляющей невелика. Поэтому обычно модулированные по длительности импульсы вначале превращают в модулированные по амплитуде, а затем демодулируют описанным выше способом. Преобразование же импульсов осуществляют при помощи генератора линейно изменяющегося напряжения. Для этого модулированные по длительности импульсы управляют работой генератора (например, подаются на вход схемы на рис. 61), в результате чего на выходе появляются модулированные по амплитуде остроконечные импульсы, которые поступают на амплитудный демодулятор.

18. Модуляция и демодуляция импульсов по фазе

Модуляторы. Модулированные по фазе импульсы могут быть получены при помощи устройства переменной задержки. Для этого импульсы вначале обычным способом модулируют по длительности (изменяя значение опорного напряжения в соответствии с формой модулирующего сигнала), а затем подают на дифференцирующую цепь. На выходе цепи появляются остроконечные импульсы чередующейся полярности, причем импульс, соответствующий спаду модулированного по длительности прямоугольного импульса, модулирован по фазе (рис. 83). Полученные остроконечные импульсы пропускают через ограничитель, на выходе которого остаются лишь модулированные по фазе импульсы. Далее они поступают в устройство, формирующее прямоугольные импульсы (см. § 3).

В устройствах многоканальной связи часто применяют иной способ получения импульсов, модулированных по

фазе — без предварительной модуляции по длительности. Для этого на вход генератора линейно изменяющегося напряжения подаются управляющие (синхронизирующие) импульсы со строго определенным периодом повторения (рис. 84). За генератором следуют сравнивающие устройства каналов, к которым подводится линейно нарастающее напряжение от генератора. Уровни сравнения этих устройств выбраны так, что импульсы на их выходах появляются во времени один за другим: сначала импульс первого канала, потом импульс второго канала и т. д. Кроме того, к каждому сравнивающему устройству канала подводится модулирующее напряжение данного канала. Поэтому уровень сравнения (например, для канала E_1) меняется в соответствии с изменением модулирующего напряжения, и на выходе сравнивающего устройства появляется перепад напряжения, причем время появления перепада изменяется в соответствии с модулирующим напряжением, т. е. перепад модулирован по фазе. Далее из этого перепада формируется прямоугольный импульс.

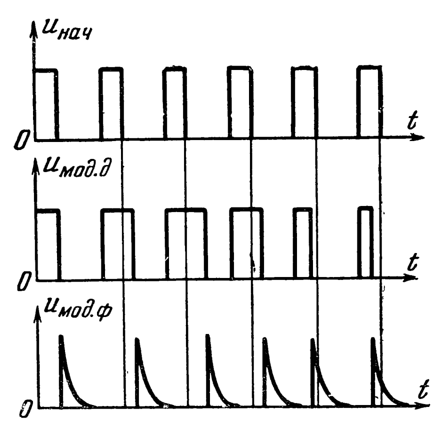


Рис. 83. Преобразование импульсов, модулированных по длительности, в модулированные по фазе.

Кроме описанных, применяется еще способ модуляции импульсов по фазе при помощи электронно-лучевого коммутатора (рис. 85). Коммутатор представляет собой сочетание электронно-лучевой трубки и коммутирующего устройства, состоящего из двух дополнительных анодов и нескольких пар (по числу каналов) дополнительных отклоняющих пластин. На отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подаются синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе на 90°. При этом электронный луч описывает на первом дополнительном аноде *1* с прорезями (назовем его экраном) окружность (рис. 85,*б*), обходя последовательно прорези в экране. Как только луч попадает в прорезь, он падает на дополнительный анод *2*, в результате чего в цепи этого анода проходит импульс тока, дли-

тельность и время появления которого совпадают с временем прохождения электронного луча через прорезь в экране. Сколько прорезей в экране, столько импульсов появится в цепи анода коммутатора за один оборот луча.

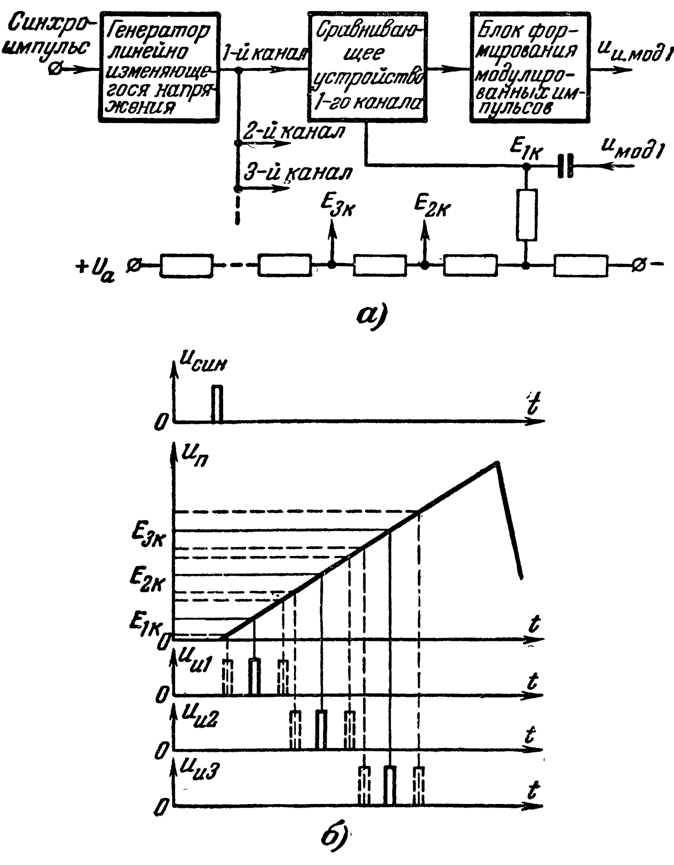


Рис. 84. Принцип построения модулятора импульсов по фазе, применяющегося в устройствах многоканальной связи.
а — блок-схема модулятора; *б* — диаграмма напряжений.

Для модуляции импульсов по фазе перед каждой прорезью имеется пара дополнительных отклоняющих пластин, на которые подается модулирующее напряжение соответствующего канала. Предположим, что в результате воздействия модулирующего напряжения верхняя пластина стала положительной и электронный луч, подходя к про-

рези и попав в электрическое поле пластин, отклонился вверх. Так как прорезь в экране косая, луч попадает в нее в этом случае несколько раньше, чем это происходило при нулевом значении модулирующего напряжения. Поэтому и импульс, возникший в цепи анода, будет несколько сдвинут во времени (рис. 85,*в*). Величина временного сдвига пропорциональна мгновенному значению модулирующего напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам.

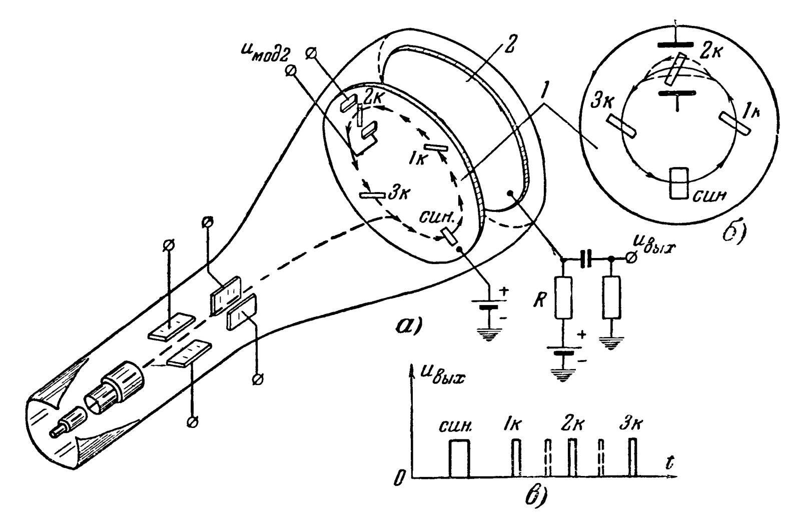


Рис. 85. Модуляция импульсов по фазе при помощи электронно-лучевого коммутатора.

а — конструкция коммутатора; *б* — иллюстрация его работы; *в* — форма напряжения на выходе.

1 — экран; *2* — второй дополнительный анод.

Если модулирующее напряжение изменит знак, верхняя отклоняющая пластина станет отрицательной. Луч пройдет прорезь уже позднее, чем при нулевом модулирующем напряжении. То же будет и с импульсом в цепи анода. Таким образом, импульс на выходе коммутатора оказывается модулированным по фазе.

В системах многоканальной связи необходима синхронизация работы передающей и приемной станций. Для этого один из импульсов должен быть синхронизирующим и отличаться от импульсов каналов, например, длительностью. Поэтому одна из прорезей экрана сделана шире, чем остальные.

Демодуляторы. Модулированные по фазе импуль-

сы можно демодулировать при помощи фильтра нижних частот, однако на выходе фильтра получается столь малое напряжение низкой частоты, что практически такой способ демодуляции не используется.

Обычно модулированные по фазе импульсы вначале превращают в модулированные по длительности или амплитуде, а уже потом демодулируют. Такое превращение производится при помощи спускового устройства (см.

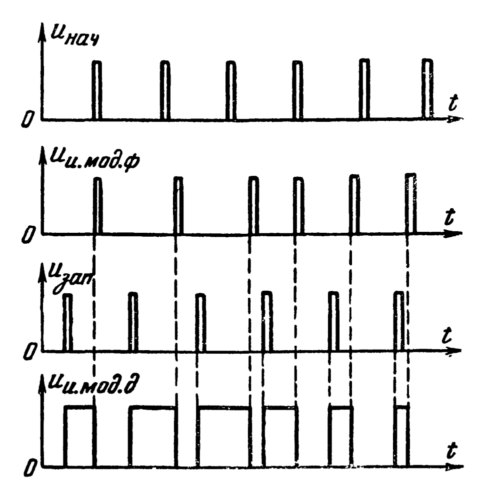


Рис. 86. Преобразование импульсов, модулированных по фазе, в модулированные по длительности при помощи спускового устройства.

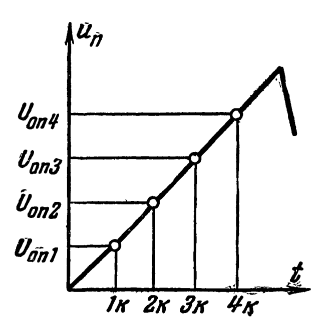


Рис. 87. Пилообразное напряжение для получения запускающих импульсов для канальных спусковых устройств в системах многоканальной связи.

§ 8). Для этого вырабатывается специальный запускающий импульс, появляющийся во времени несколько раньше самого «раннего» положения модулированного по фазе импульса (рис. 86). Этот запускающий импульс подается на спусковое устройство (например, в схеме на рис. 38 на анод лампы $Л_2$ в отрицательной полярности), вызывая его срабатывание. Через некоторое время на спусковое устройство поступает модулированный по фазе импульс, вызывающий обратное срабатывание. В результате на выходе спускового устройства появляется импульс, длительность которого зависит от времени появления модулированного по фазе импульса. Изменяется момент появления модулированного по фазе импульса — изменяется и длительность выходного импульса, т. е. модулированный по фазе входной импульс превращается в импульс, модулированный по длительности.

В многоканальных устройствах связи запускающие импульсы для каждого канала вырабатываются следующим образом. Из последовательности принятых импульсов выделяется синхронизирующий импульс, например, при помощи селектора импульсов по длительности (см. гл. 8, рис. 91). Этот импульс запускает генератор линейно изменяющегося напряжения (рис. 87). Напряжение с выхода этого генератора подается на сравнивающие устройства каналов, опорные напряжения которых подобраны так, чтобы в начале временного интервала первого канала срабатывало сравнивающее устройство первого канала и на его выходе появлялся запускающий импульс для спускового устройства первого канала, затем в начале временного интервала второго канала срабатывало сравнивающее устройство второго канала и т. д.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

СЕЛЕКЦИЯ ИМПУЛЬСОВ

Селекцией импульсов называется выделение импульсов с заданными параметрами (т. е. имеющих какие-либо отличия по амплитуде, длительности, фазе, частоте повторения и т. д.) из общей последовательности импульсов. Селекция находит применение там, где необходимо осуществить разделение импульсов с разными параметрами, передаваемых по одной линии, или необходимо защитить приемное устройство от действия помех, представляющих собой импульсы с иными, «чужими», параметрами. Селекция импульсов встречается в многоканальной радиосвязи, в телевидении, в радиолокации, в системах опознования, когда прием импульсов определенного вида является признаком того, что самолет или радиостанция, пославшие этот импульс, «свои» и т. п. Существует много способов селекции импульсов по самым различным параметрам. Мы рассмотрим только селекцию одиночных импульсов по амплитуде, длительности и временно́му совпадению.

19. Селекция импульсов по амплитуде

Амплитудные селекторы делятся на:

1) селекторы, выделяющие импульсы, амплитуда которых превышает определенный уровень;

2) селекторы, выделяющие импульсы, амплитуда которых меньше определенного уровня;

3) селекторы, выделяющие импульсы, амплитуда которых лежит между двумя определенными уровнями.

Селекцию первого вида можно осуществить, например, при помощи ограничителя по минимуму. В этом случае уровень ограничения E должен быть равен заданному уровню минимальной амплитуды импульсов. Тогда на вы-

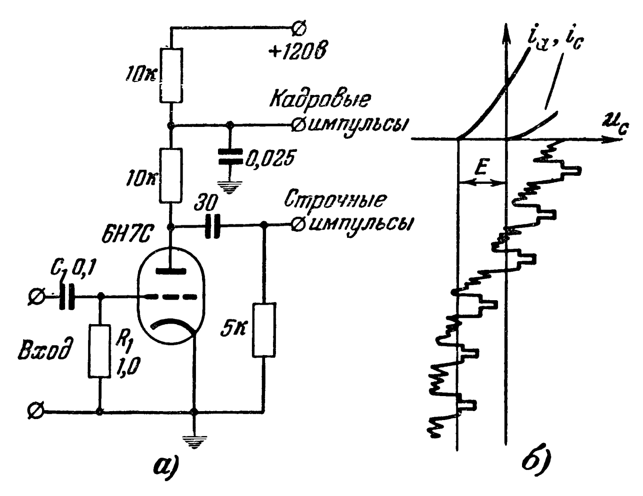


Рис. 88. Селектор импульсов по амплитуде, применяющийся для выделения из телевизионного сигнала импульсов синхронизации.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжения на сетке лампы.

ходе ограничителя появятся только те импульсы, амплитуда которых превышает этот уровень.

К селекторам первого вида относится также схема, применяющаяся в телевидении для выделения из общего телевизионного сигнала синхронизирующих импульсов строчной и кадровой разверток (рис. 88). Как известно, синхронизирующие импульсы в детектированном телевизионном сигнале превышают по амплитуде видеосигнал. Поэтому, если произвести ограничение телевизионного сигнала по минимуму до уровня самых больших по амплитуде видеоимпульсов (до уровня «черного»), то на выход ограничителя пройдут только синхронизирующие импульсы.

Телевизионный сигнал подается на сетку лампы ограничителя через цепь R_1C_1. В начальный момент смещение

на сетке равно нулю, и поданный сигнал вызывает большой сеточный ток, который заряжает конденсатор C_1. Благодаря этому происходит смещение рабочей точки характеристики лампы в область отрицательных значений. Так будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равновесное состояние, при котором заряд конденсатора C_1 уравновесится его разрядом через сопротивление R_1. Напряжение на конденсаторе при этом определяет уровень ограничения (рис. 88,*б*).

Так как полукадровый синхронизирующий импульс по длительности много продолжительнее строчного, то разделение их не представляет труда. Для этого импульсы подаются на *RC*-цепи с разными постоянными времени, причем строчный импульс снимается с сопротивления, а кадровый — с конденсатора (последняя цепь *RC* называется и н т е г р и р у ю щ е й).

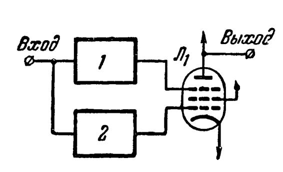


Рис. 89. Блок-схема селектора, выделяющего импульсы, амплитуды которых меньше определенной величины.

1 — ограничитель по минимуму; *2* — линия задержки.

Выделение импульсов, амплитуда которых лежит ниже определенного предела, может быть произведено при помощи селектора, блок-схема которого приведена на рис. 89.

Если амплитуда входного импульса не превышает уровень ограничения по минимуму, то на выходе ограничителя *1* не создается напряжения, и входной импульс через линию задержки *2* и открытую лампу $Л_1$ проходит на выход селектора. Если же входной импульс по амплитуде превышает уровень ограничения, то на выходе ограничителя *1* появится напряжение, запирающее лампу $Л_1$. Такой входной импульс уже не сможет пройти через лампу на выход селектора. Линия задержки *2* в этой схеме включена для того, чтобы задержать поступление входного импульса на сетку лампы $Л_1$ и дать тем самым время отрицательному напряжению на выходе ограничителя *1* нарасти и запереть лампу.

Выделение импульсов, амплитуды которых лежат в определенных пределах, может быть осуществлено при помощи устройства, блок-схема которого представлена на рис. 90.

Селектор состоит из двух двусторонних ограничителей, работающих на общую нагрузку. Ограничители «выре-

зают» из входных импульсов узкие полоски, первый от E_3 до E_2, второй от E_2 до E_1. Предположим, что входной импульс превышает максимальный уровень E_3 первого ограничителя. В этом случае и первый и второй ограничители вырежут из него полоски, равные по амплитуде, но противоположные по знаку, благодаря чему произойдет взаимная компенсация импульсов на сопротивлениях нагрузки и на выходе селектора напряжение будет равно нулю. Если входной импульс не достигает по амплитуде

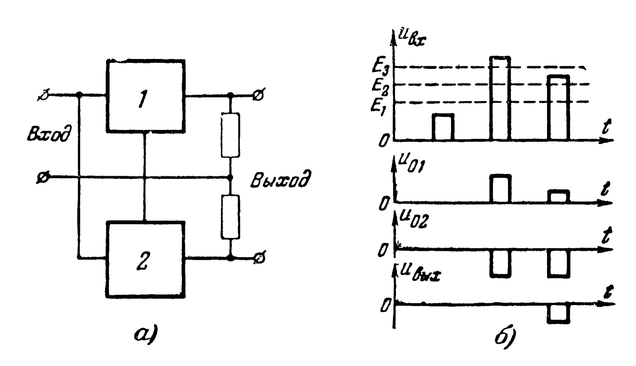


Рис. 90. Блок-схема селектора для выделения импульсов, амплитуды которых лежат в определенных пределах.

а — блок-схема селектора (*1* и *2* — двусторонние ограничители); *б* — диаграммы напряжений.

значения E_1, то оба ограничителя не пропустят его и напряжение на выходе селектора опять будет равно нулю.

Если же амплитуда входного импульса лежит между уровнями E_1 и E_3, то ограничители вырежут из него неодинаковые по амплитуде полоски и полной компенсации на сопротивлении нагрузки не произойдет. На выходе селектора появится импульс.

20. Селекция импульсов по длительности

Селекторы импульсов по длительности делятся на:

1) селекторы, выделяющие импульсы, длительность которых превышает определенную величину;

2) селекторы, выделяющие импульсы, длительность которых меньше определенной величины;

3) селекторы, выделяющие импульсы, длительность которых лежит в определенных пределах.

Простейшим селектором первого типа может служить

устройство, схема которого приведена на рис. 91. Входной положительный импульс заряжает конденсатор C через большое сопротивление R_1. Диод $Л_1$ при этом закрыт, так как его катод положителен относительно анода. Заметим, что схема может работать и с отрицательными входными импульсами, если изменить полярность включения диода. После окончания входного импульса диод открывается и

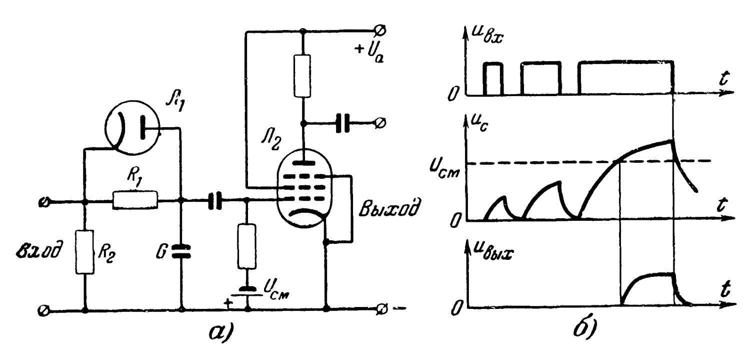


Рис. 91. Селектор, выделяющий импульсы, длительность которых превышает определенную величину.

а — принципиальная схема; *б* — форма напряжений на различных участках схемы.

конденсатор C быстро разряжается через диод и малое сопротивление R_2.

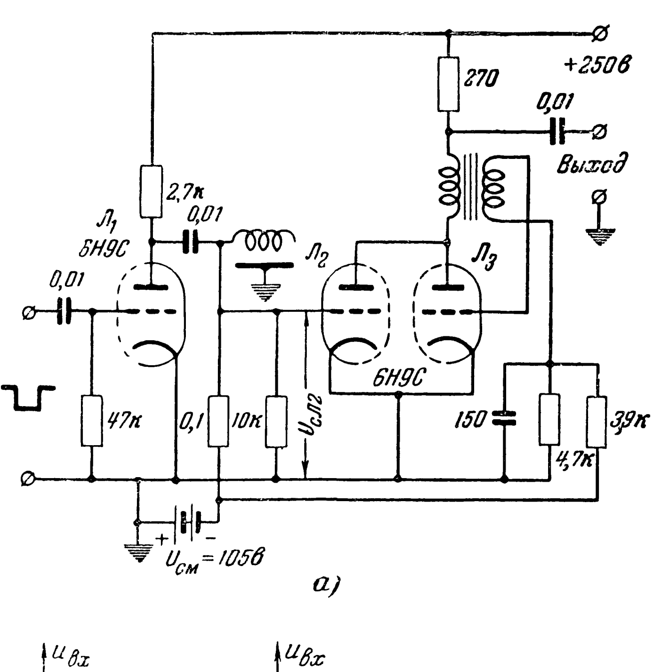
Напряжение, до которого заряжается конденсатор C во время действия входного импульса, пропорционально длительности этого импульса (рис. 91,*б*). Поэтому конденсатор C может зарядиться до значения напряжения $U_{см}$ только от такого входного импульса, длительность которого не меньше определенной величины.

Когда напряжение на конденсаторе C достигнет значения $U_{см}$, откроется запертая до этого времени лампа $Л_2$ и на выходе селектора появится импульс.

Существенный недостаток такого селектора заключается в том, что он обладает низкой разрешающей способностью, т. е. может различать лишь импульсы, значительно отличающиеся по длительности. Кроме того, длительность импульсов должна быть большой, порядка нескольких десятков микросекунд.

Схема более совершенного селектора, выделяющего импульсы, длительность которых превышает определенную величину, приведена на рис. 92.

В анодную цепь лампы $Л_1$ включена линия задержки,



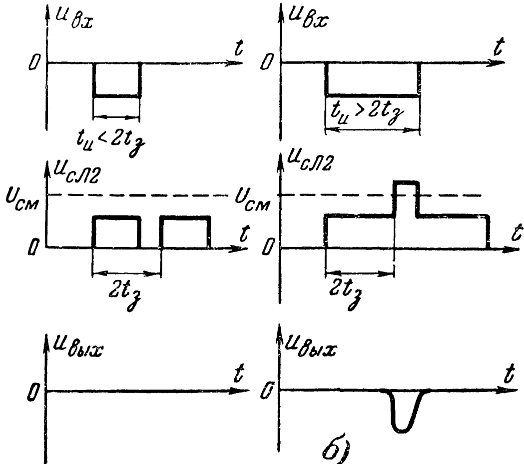


Рис. 92. Селектор с линией задержки, выделяющий импульсы, длительность которых превышает определенную величину.

а — принципиальная схема; *б* — иллюстрация работы селектора.

разомкнутая на конце и согласованная на входе. Входной импульс вызывает появление в анодной цепи лампы $Л_1$, а следовательно, и на входе линии задержки импульса такой же длительности. Отразившись от разомкнутого конца линии, этот импульс возвращается к началу линии через время, равное удвоенному времени задержки линии. Поэтому, если длительность входного импульса меньше $2t_з$ линии (рис. 92,*б*), то входной и задержанный импульсы не совпадают во времени. В этом случае амплитуда этих

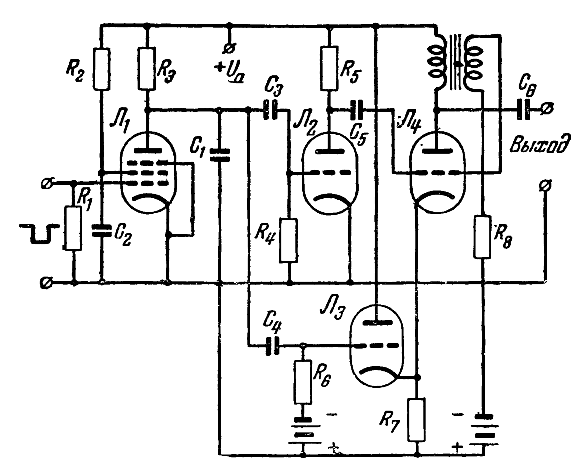


Рис. 93. Схема селектора, выделяющего импульсы, длительность которых меньше определенной величины.

импульсов будет недостаточна, чтобы открыть лампу $Л_2$ и запустить блокинг-генератор на лампе $Л_3$.

Если же длительность входного импульса превышает $2t_з$ линии, то задержанный линией импульс совпадает во времени с частью входного импульса. Их суммарная положительная амплитуда на сетке лампы $Л_2$ превысит отрицательное смещение, и лампа $Л_2$ откроется, запустив блокинг-генератор. На выходе селектора при этом появится импульс.

На рис. 93 приведена схема селектора, выделяющего импульсы с длительностью меньше определенной величины. Входные импульсы с отрицательной полярностью поступают на сетку лампы $Л_1$, запирая лампу. При этом напряжение на ее аноде увеличивается и конденсатор C_1 начинает заряжаться, причем амплитуда напряжения на нем пропорциональна длительности входных импульсов. Если

длительность входных импульсов не превышает некоторой величины, то напряжение на конденсаторе C_1 не успевает нарасти настолько, чтобы превысить отрицательное смещение на лампе $Л_3$ и открыть эту лампу. Цепь R_4C_3, дифференцирующая напряжение на конденсаторе C_1, создает импульс, который, пройдя лампу $Л_2$, запустит блокинг-генератор на лампе $Л_4$.

Если же длительность входного импульса превышает заданную, то амплитуда напряжения на конденсаторе C_1 превысит напряжение смещения лампы $Л_3$, лампа откроется и ее катодный ток, проходя по сопротивлению R_7, запрет лампу $Л_4$ блокинг-генератора.

Эта же схема может быть использована в качестве селектора для выделения импульсов, длительность которых лежит в определенных пределах. Для этого надо подавать линейно нарастающее напряжение с конденсатора C_1 на лампу $Л_2$ без дифференцирования (цепь R_4C_3 не является дифференцирующей) и, кроме того, включить между сопротивлением R_4 и землей источник отрицательного смещения сетки лампы $Л_2$. Тогда входной импульс, длительность которого превышает определенную величину, но меньшую верхнего заданного предела, откроет лампу $Л_2$ и запустит блокинг-генератор, а входной импульс, длительность которого превышает верхний предел, откроет лампу $Л_3$ и запрет блокинг-генератор.

Схема селектора, выделяющего импульсы определенной длительности, приведена на рис. 94. Принцип работы этой схемы тот же, что и схемы на рис. 92.

Входные импульсы поступают на сетку лампы $Л_1$. В анодную цепь этой лампы включена короткозамкнутая линия задержки, согласованная на входе со схемой. Чтобы это согласование было неизменным, внутреннее сопротивление лампы $Л_1$ должно быть много больше сопротивления нагрузки. Короткозамкнутая линия каждый перепад напряжения преобразует в прямоугольный импульс противоположной полярности (см. гл. 1), длительность которого равна удвоенному времени задержки линии. Поэтому входной импульс в анодной цепи лампы $Л_1$ преобразуется в два прямоугольных импульса с различной полярностью и с длительностью $2t_{з1}$ каждый.

Эти импульсы поступают на сетку лампы $Л_2$ и, изменив полярность, попадают на вход второй короткозамкнутой линии, также согласованной на входе со схемой, но имеющей время задержки большее, чем у первой линии. Так как

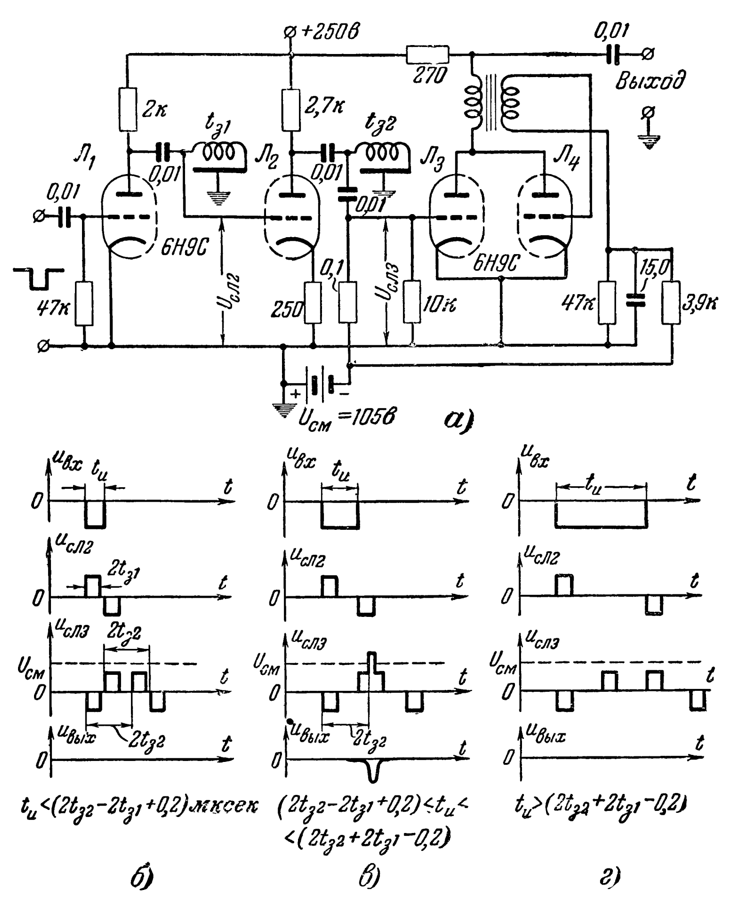


Рис. 94. Селектор, выделяющий импульсы определенной длительности.

а — принципиальная схема; *б* и *г* — иллюстрация работы селектора при длительности входного импульса меньше или больше выбранных пределов; *в* — работа ограничителя при длительности входного импульса в заданных пределах.

линия короткозамкнутая, то поданные на ее вход импульсы вернутся обратно с противоположной полярностью через время $2t_{з2}$ и на сетку лампы $Л_3$ поступят уже четыре прямоугольных импульса длительностью $2t_{з1}$. Лампа $Л_3$, управляющая запуском блокинг-генератора, заперта отрицательным смещением, причем только двойная амплитуда полученных прямоугольных импульсов может отпереть эту лампу. Чтобы блокинг-генератор был запущен, лампа $Л_3$

должна открыться самое малое на 0,2 *мксек*, для чего положительные прямоугольные импульсы на ее сетке должны совпадать во времени. Как видно из рис. 94, *б* и *г*, при длительности входного импульса менее $2t_{з2}-2t_{з1}+0{,}2$ *мксек* или более $2t_{з2}+2t_{з1}-0{,}2$ *мксек* такого совпадения не происходит. Но если длительность входного импульса больше $2t_{з2}-2t_{з1}+0{,}2$ *мксек*, но меньше $2t_{з2}+2t_{з1}-0{,}2$ *мксек* (рис. 94, *в*), то совпадение имеет место, лампа $Л_3$ открывается, запуская блокинг-генератор, и на выходе селектора появляется импульс.

21. Селекция импульсов по совпадению

Сущность такой селекции заключается в том, что выходной импульс селектора появляется только при совпадении во времени двух (или больше) импульсов, поданных на его вход. Необходимость такой селекции встречается, например, в устройствах многоканальной связи, где надо выделить импульс данного канала из общей последовательности принятых импульсов. Обычно один из импульсов создается в самом импульсном устройстве для управления работой селектора и поэтому называется селекторным.

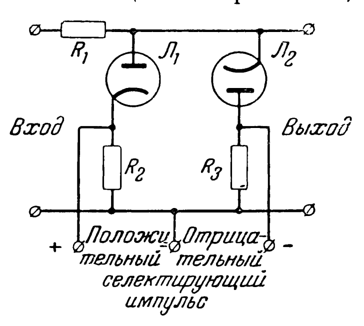


Рис. 95. Селектор импульсов по совпадению во времени на диодах.

Схемы селекторов импульсов по совпадению во времени очень разнообразны. Мы рассмотрим только две из них.

Входные импульсы в схеме на рис. 95 могут быть любой полярности. Предположим, что они положительные. Если в момент прихода входного импульса селекторный импульс (в данном случае тоже положительный) отсутствует, то входной импульс не может пройти на выход селектора, так как диод $Л_1$ при этом откроется и шунтирует выход. Если же в момент появления входного импульса появляется и селекторный импульс равной или большей амплитуды, то диод $Л_1$ закроется и входной импульс пройдет на выход селектора. То же самое будет присходить при отрицательной полярности входного импульса (и отрицательном

селекторном импульсе), но теперь шунтировать выход селектора будет диод $Л_2$.

Для хорошей работы схемы сопротивление R_1 должно быть много больше сопротивлений R_2 и R_3.

Схема селектора импульсов по совпадению во времени на пентоде приведена на рис. 96. Входные положительные импульсы подаются на управляющую сетку лампы, однако так как лампа заперта по анодному току за счет отрица-

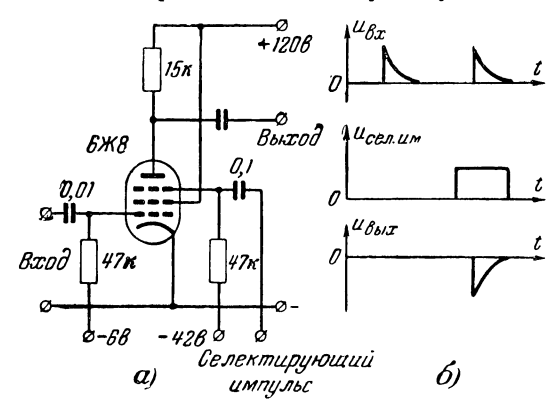


Рис. 96. Селектор импульсов по совпадению во времени на пентоде.

а — принципиальная схема; *б* — иллюстрация работы селектора.

тельного напряжения на защитной сетке, они не могут пройти на выход селектора.

Если в момент появления на управляющей сетке входного импульса на защитную сетку поступает положительный селекторный импульс, амплитуда которого превышает отрицательное напряжение на ней, то лампа отпирается и входные импульсы проходят на выход.

Так как лампа в исходном положении заперта и по управляющей сетке, то только селекторный импульс (без участия входного) не сможет отпереть лампу. Этим исключается ложное срабатывание селектора от действия селекторного импульса.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

НЕКОТОРЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении параметров электрических импульсов приходится иметь дело с резкими изменениями напряжения, происходящими в очень короткие промежутки времени, за-

нимающие иногда доли микросекунды. Для регистрации таких быстрых изменений необходимы практически безынерционные приборы. Кроме того, в большинстве случаев нужно измерить не только амплитуду импульса, частоту повторения и т. п., но и исследовать форму импульса, определить длительность его отдельных частей, выявить искажения импульса при прохождении через какое-либо устройство.

В подавляющем большинстве случаев все это можно проделать лишь при помощи электронно-лучевого осциллографа.

Не всякий электронно-лучевой осциллограф может быть применен для импульсных измерений. Прежде всего это относится к его генератору развертки. В обычных осциллографах генератор развертки работает непрерывно. С таким генератором развертки можно исследовать только периодически повторяющиеся импульсы, причем длительность каждого импульса должна составлять не менее 1/10 времени повторения. Если же длительность импульсов менее 1/10 времени повторения или импульсы повторяются непериодически или однократно, то нужен генератор ждущей развертки, который при отсутствии исследуемых импульсов на входе осциллографа находится в исходном, «ждущем», состоянии и запускается самим исследуемым импульсом. После окончания прямого хода развертки генератор возвращается в исходное состояние, ожидая прихода следующего запускающего импульса. В зависимости от длительности исследуемых импульсов подбирается длительность прямого хода развертки, колеблющаяся от долей секунды до нескольких микросекунд. В качестве генератора ждущей развертки могут использоваться устройства, рассмотренные в гл. 3 и 4.

Генератор ждущей развертки обладает крупным недостатком. Так как спуск генератора производится самим исследуемым импульсом, то неизбежно некоторое запаздывание начала развертки относительно начала исследуемого импульса. Это приводит к тому, что начало исследуемого импульса не видно на экране. Избежать этого можно двумя путями. Во-первых, можно в цепь Y-канала осциллографа включить линию, задерживающую исследуемый импульс на время, равное запаздыванию начала ждущей развертки. Но при этом происходит неизбежное искажение исследуемого импульса (см. гл. 1).

Во-вторых, если можно управлять источником исследу-

емых импульсов, то осциллограф комплектуется специальным блоком задержки, который вырабатывает два импульса, сдвинутых во времени один относительно другого. Первый, более ранний, импульс запускает генератор ждущей развертки, а второй, более поздний, — источник исследуемых импульсов. Поэтому исследуемый импульс поступает на вход осциллографа уже после начала прямого хода развертки. Это позволяет обойтись без линии задержки в Y-канале.

Для того чтобы исследуемые импульсы искажались возможно меньше, усилитель вертикального отклонения должен иметь широкую полосу пропускания (до нескольких мегагерц). Если исследуемые импульсы имеют достаточно большую амплитуду, то их для уменьшения искажений целесообразно подавать непосредственно на вертикальные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки.

22. Измерение амплитуды импульсов

Измерение амплитуды импульсов производится при помощи лампового вольтметра или осциллографа.

Измерения ламповым вольтметром могут быть произведены только в том случае, если исследуемые импульсы периодически повторяются и имеют одинаковую амплитуду и полярность. При этом следует иметь в виду, что вольтметр покажет не амплитудное значение U_m напряжения импульсов, а пиковое $U_{пик}$, измеренное относительно уровня постоянной составляющей U_0. В случае прямоугольной формы исследуемых импульсов $U_0 = U_m k_з$ ($k_з$ — коэффициент заполнения импульсов) вольтметр покажет:

$$U_{пик} = U_m - U_0 = U_m (1 - k_з).$$

При измерении амплитуды импульсов при помощи электронно-лучевого осциллографа предварительно необходимо произвести его градуировку, т. е. составить графики зависимости величины отклонения пятна на экране от величины напряжения, поданного на вертикально отклоняющие пластины трубки. Если амплитуда исследуемых импульсов слишком мала, чтобы подавать непосредственно на отклоняющие пластины, и их приходится предварительно усиливать в Y-усилителе осциллографа, то должны быть составлены графики этой зависимости также при различных положениях ручки регулировки усиления. Обычно для удобства измерений по этим графикам вычерчивается мас-

штабная сетка, устанавливаемая перед экраном осциллографа (рис. 97). При импульсных измерениях входная емкость осциллографа, а также емкость проводников, связывающих вход осциллографа с исследуемой цепью, шунтирует внутреннее сопротивление источника импульсов, что вызывает изменение формы импульсов. Поэтому целесообразно применять входной пробник.

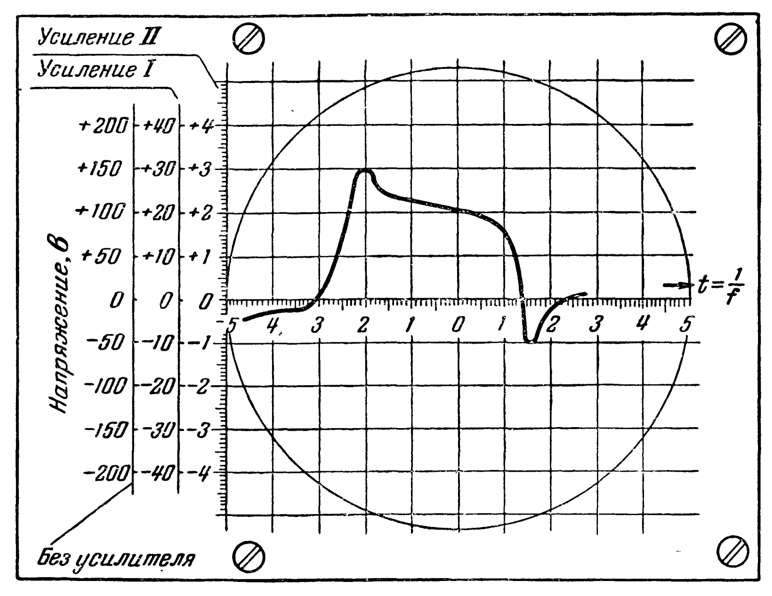


Рис. 97. Градуированная масштабная сетка, устанавливаемая перед экраном осциллографа.

Способ непосредственного измерения по изображению импульса на экране не всегда обеспечивает достаточную точность, так как она зависит от большого числа факторов.

Более качественные результаты можно получить при измерении компенсационным способом. Схема установки для таких измерений приведена на рис. 98. Измерительным прибором здесь служит вольтметр постоянного или переменного тока нужного класса точности с большим внутренним сопротивлением. Осциллограф играет роль индикатора. При измерении движок потенциометра R_1 устанавливается в положение, при котором основание измеряемого импульса совпадает с нулевой линией на масштабной сетке осциллографа. Далее перемещением движка потен-

циометра R_2 добиваются нулевого показания вольтметра. После этого движок потенциометра R_1 вновь перемещают до тех пор, пока на нулевой линии не окажется вершина измеряемого импульса. При этом вольтметр укажет амплитуду этого импульса.

Наконец, можно измерять амплитуду импульсов способом сравнения. Это особенно удобно при измерении импульсов с малой амплитудой, которые в обычном случае надо предварительно усиливать, т. е. когда полученные результаты зависят от постоянства уровня усиления. В случае измерения способом сравнения такой зависимости нет, так как амплитуда импульса измеряется не по градуированной сетке, а путем сравнения с известной амплитудой синусоидального напряжения. Для этого на вход усилителя вначале подаются исследуемые импульсы, а затем вспомогательное синусоидальное напряжение, амплитуда которого подбирается такой, чтобы она совпала на экране с амплитудой импульса. Измеряя ламповым вольтметром двойную амплитуду синусоидального напряжения, тем самым определяют и амплитуду исследуемых импульсов.

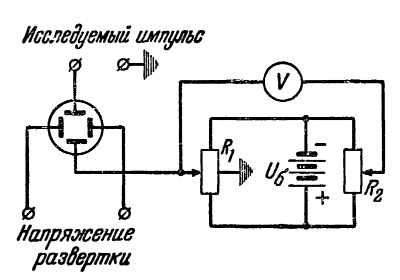


Рис. 98. Схема для измерения амплитуды импульсов компенсационным способом.

23. Измерение длительности импульса и его частей

Измерение длительности импульса может быть произведено путем сравнения ширины его изображения на экране осциллографа с временным масштабом развертки (рис. 99), который определяется как

$$t \approx \frac{1}{f},$$

где t — время, в течение которого луч проходит от одного края экрана трубки до другого, *сек*;

f — частота развертки, *гц*.

Последнее равенство является приближенным, так как не учитывает время, затрачиваемое лучом на обратный

ход. Если известно время обратного хода, то в приведенную формулу следует внести поправку. Кроме того, полученный результат зависит от того, насколько точно определена частота f развертки.

Значительно более точные результаты получаются при использовании для временного масштаба развертки калиброванных меток. Схема устройства, вырабатывающего такие метки, была приведена на рис. 10. Если импульсы меток подавать на катод (или на управляющий электрод) трубки, то изображение исследуемых импульсов на экране будет состоять из ярких и темных точек, расстояние по горизонтали между которыми соответствует выбранному масштабу (1 *мксек*, 2 *мксек* и т. д.). Такой способ калибровки временного масштаба удобен еще и тем, что может быть применен и при ждущей развертке, когда определение длительности импульса по временному масштабу развертки затруднительно.

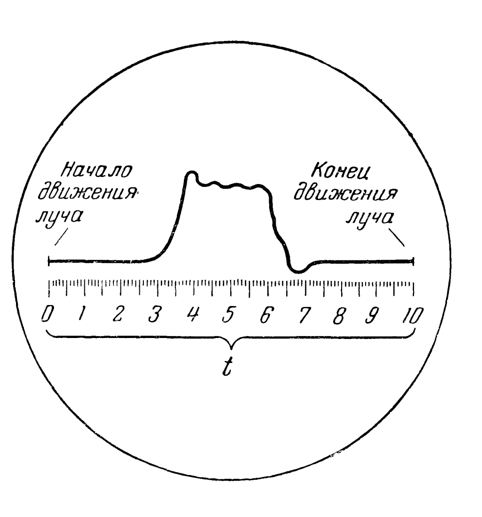


Рис. 99. Измерение длительности импульса по временному масштабу экрана осциллографа.

Иногда при импульсных измерениях возникает необходимость исследовать стабильность длительности импульса или определить, на какую величину изменяется эта длительность. Изменение длительности импульса обычно составляет доли микросекунды, поэтому произвести такие измерения при помощи описанных выше методов почти невозможно, особенно если длительность импульса изменяется относительно быстро. В таких случаях применяют осциллографы с круговой разверткой и специальную электронно-лучевую трубку с дополнительным центральным отклоняющим электродом (рис. 100).

На обычные отклоняющие пластины такой трубки подаются синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе

на 90°. Электронный луч при этом описывает на экране окружность. Радиус окружности зависит от напряжений развертки на отклоняющих пластинах. Если же на центральный электрод подать исследуемое напряжение, то радиус окружности в каждый момент времени будет изменяться в соответствии с изменением величины и полярности исследуемого напряжения.

Время оборота луча на экране равно или кратно периоду синусоидального напряжения. Это напряжение обычно

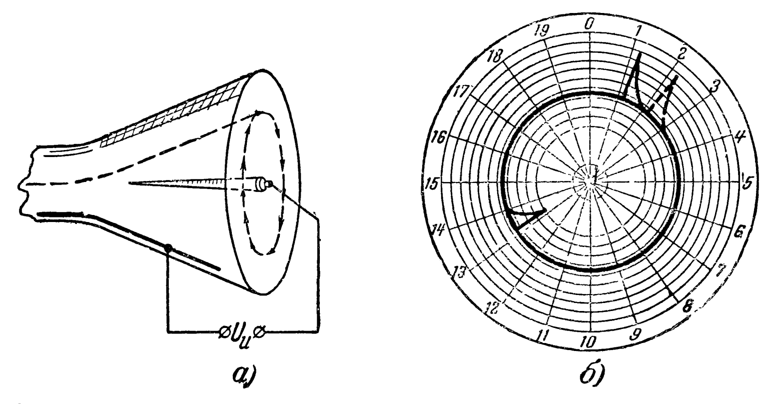


Рис. 100. Измерение длительности импульсов при помощи осциллографа с круговой разверткой и электронно-лучевой трубкой с центральным отклоняющим электродом.

а — конструкция трубки с центральным отклоняющим электродом; *б* — осциллограмма при кольцевой развертке.

получают от стабилизированного генератора, поэтому можно считать, что каждый градус круговой шкалы соответствует определенному временному промежутку.

Если теперь исследуемый импульс пропустить через дифференцирующий контур и полученные на выходе импульсы подать на центральный отклоняющий электрод трубки, причем первый импульс, соответствующий началу исследуемого импульса, синхронизировать с напряжением развертки, то на экране (рис. 100,*б*) появятся два импульса — неподвижный, соответствующий началу исследуемого импульса, и перемещающийся, соответствующий спаду. Величина перемещения последнего будет характеризовать изменение длительности импульса. Чтобы это перемещение было хорошо заметно на экране, скорость круговой развертки выбирают такой, что луч за время длительности

исследуемого импульса успевает сделать несколько оборотов на экране, т. е. растягивают временной масштаб. Таким методом удается измерять очень малые временные промежутки с большой точностью.

24. Измерение частоты импульсов

Если импульсы следуют периодически, то частоту их повторения f_u можно определить путем сравнения с известной частотой синусоидального напряжения f_c. Измерение производится в два этапа. Вначале исследуемые импульсы подаются на Y-пластины осциллографа; они же используются для синхронизации частоты развертки.

Добившись устойчивого изображения на экране и измерив расстояние между двумя соседними импульсами, отключают источник исследуемых импульсов от Y-пластин и подают на эти пластины синусоидальное напряжение. Синхронизация развертки по-прежнему осуществляется исследуемыми импульсами. Изменяя частоту синусоидального напряжения, добиваются прекращения движения синусоиды по экрану трубки. При этом следует иметь в виду, что движение синусоиды может прекращаться при многих значениях частоты синусоидального напряжения, поэтому нужно подобрать такое значение частоты f_c, при котором период синусоиды, полученной на экране, окажется равным или близким к значению ранее измеренного периода исследуемых импульсов.

Полученное значение частоты f_c является пока только приближенным значением частоты импульсов. Затем приступают к точному определению этой частоты. Для этого исследуемое импульсное напряжение подают на Y-пластины трубки, а синусоидальное напряжение с найденной частотой $f_c \approx f_u$ — на X-пластины. Плавно изменяя частоту синусоидального напряжения f_c, добиваются устойчивого положения изображения на экране, на котором в этот момент должен быть виден только один импульс. В таком положении частота синусоидального напряжения f_c точно равна частоте импульсов f_u.

Описанное измерение можно производить и без предварительной грубой оценки частоты импульсов f_u. Однако в этом случае легко ошибиться, так как при втором (точном) этапе измерения можно получить на экране трубки один импульс не только при равенстве частоты импульсов

и частоты синусоидального напряжения, но и при кратном их отношении.

Удобно измерение частоты импульсов описанным способом производить при помощи осциллографа с круговой разверткой и радиальным отклонением. В этом случае синусоидальное напряжение с частотой f_c создает круговую развертку, а исследуемые импульсы подаются на электрод радиального отклонения. Если частота импульсов

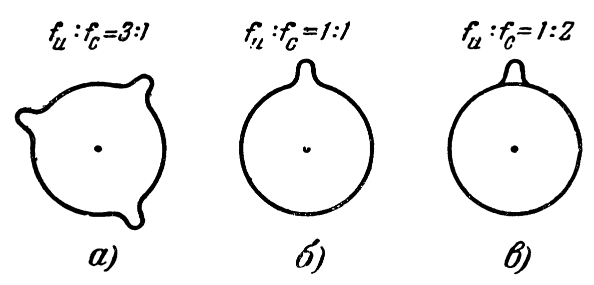


Рис. 101. Измерение частоты импульсов при помощи осциллографа с круговой разверткой.

а — осциллограмма при частоте исследуемых импульсов в 3 раза выше частоты синусоидального напряжения развертки; *б* — то же при равенстве частот; *в* — то же при частоте исследуемых импульсов в 2 раза меньше частоты синусоидального напряжения развертки.

выше частоты синусоидального напряжения, то осциллограмма принимает вид, показанный на рис. 109,*а*, если ниже, то представленный на рис. 101,*в*. Наконец, если частота f_u импульсов и частота f_c синусоидального напряжения совпадают, то на один оборот луча приходится один импульс и осциллограмма принимает вид, изображенный на рис. 101,*б*. Как следует из сказанного, в случае применения осциллографа с круговой разверткой и радиальным отклонением нет необходимости в предварительном приближенном определении частоты $f_й$, так как осциллограммы для отношений частот $f_u:f_c=1:1$ и $f_u:f_c=1:2$ и т. п. различны.

25. Устройства для счета импульсов

Подсчет числа непериодических импульсов, следующих с небольшими промежутками, производится при помощи делителей числа импульсов. Как уже было сказано (см. § 12), на выходе делителя число импульсов в k раз меньше числа входных импульсов. Если коэффициент k достаточно

велик, то скорость следования выходных импульсов будет небольшой и они могут быть подсчитаны обычным механическим счетчиком. Умножение показания счетчика на коэффициент k дает число входных импульсов за данный промежуток времени.

Количество импульсов, подлежащих счету, может достигать миллионов в секунду. Для подсчета такого числа импульсов коэффициент k должен быть очень велик. Поэтому устройства для счета импульсов состоят из делительных ячеек, соединенных последовательно.

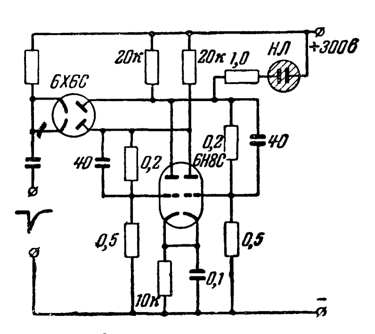


Рис. 102. Делительная ячейка.

Делительные ячейки обычно бывают двух типов. Первый представляет собой спусковое устройство (рис. 102). Входные отрицательные импульсы подаются на аноды ламп, причем к аноду левого триода присоединена неоновая лампа *НЛ*. После каждого входного импульса спусковое устройство переходит из одного состояния в другое, а неоновая лампа то гаснет, то загорается. Количество ее вспышек в 2 раза меньше количества входных импульсов. Скорость следования входных импульсов в такой ячейке не должна превышать скорость перехода спускового устройства из одного состояния в другое.

Другой тип делительной ячейки представляет собой сочетание накопительного устройства и ждущего блокинг-генератора (рис. 103). В момент прихода положительного входного импульса диод $Л_1$ открывается и конденсатор C_2 заряжается на некоторую величину U_1. Одновременно заряжается и переходный конденсатор C_1, однако как только входной импульс окончится и диод $Л_1$ запрется, этот конденсатор разрядится через открывшийся диод $Л_2$. Напряжение же на конденсаторе C_2 останется неизменным.

Во время действия второго входного импульса произойдет то же самое, в результате чего напряжение на конденсаторе C_2 увеличится еще на величину U_2 и станет равным U_1+U_2. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на конденсаторе C_2 не достигнет потенциала отпирания лампы блокинг-генератора. Произойдет срабаты-

вание блокинг-генератора, разряд конденсатора C_2 и генерирование выходного импульса. Напряжение на конденсаторе C_2, как видно из рис. 103,*б*, нарастает ступеньками, причем число этих ступенек k соответствует коэффициенту деления накопительного устройства, т. е. количество выходных импульсов блокинг-генератора в k раз меньше

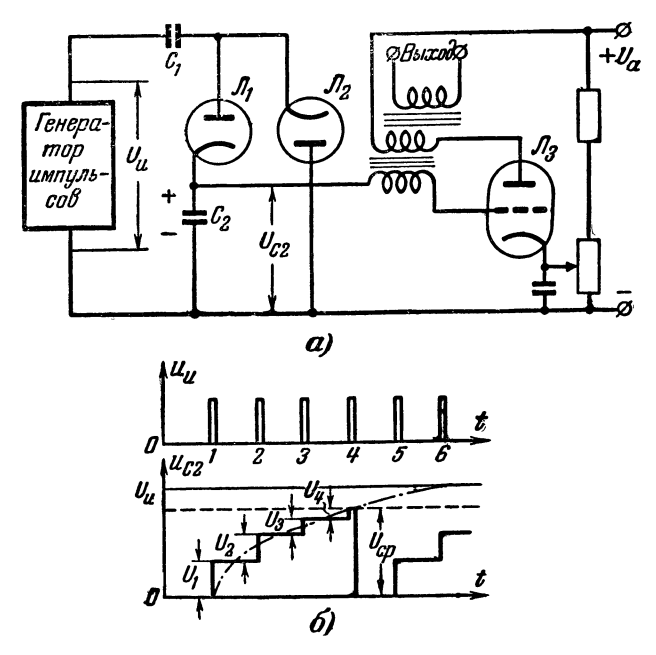


Рис. 103. Делительная ячейка, состоящая из накопительного устройства и ждущего блокинг-генератора.

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма напряжений.

количества импульсов, подаваемых на вход делительной ячейки.

По мере приближения напряжения на конденсаторе C_2 к амплитуде входных импульсов высота ступенек, т. е. величина приращения напряжения на конденсаторе C_2 от каждого входного импульса, делается все меньше. Это заставляет выбирать уровень напряжения U_{cp} срабатывания блокинг-генератора немного меньше амплитуды входных импульсов и тем самым ограничивать коэффициент деле-

ния k, который редко бывает больше 5—10. Если этого не сделать, то стабильность срабатывания будет невелика: блокинг-генератор может сработать и после 15-го и после 16-го входного импульса.

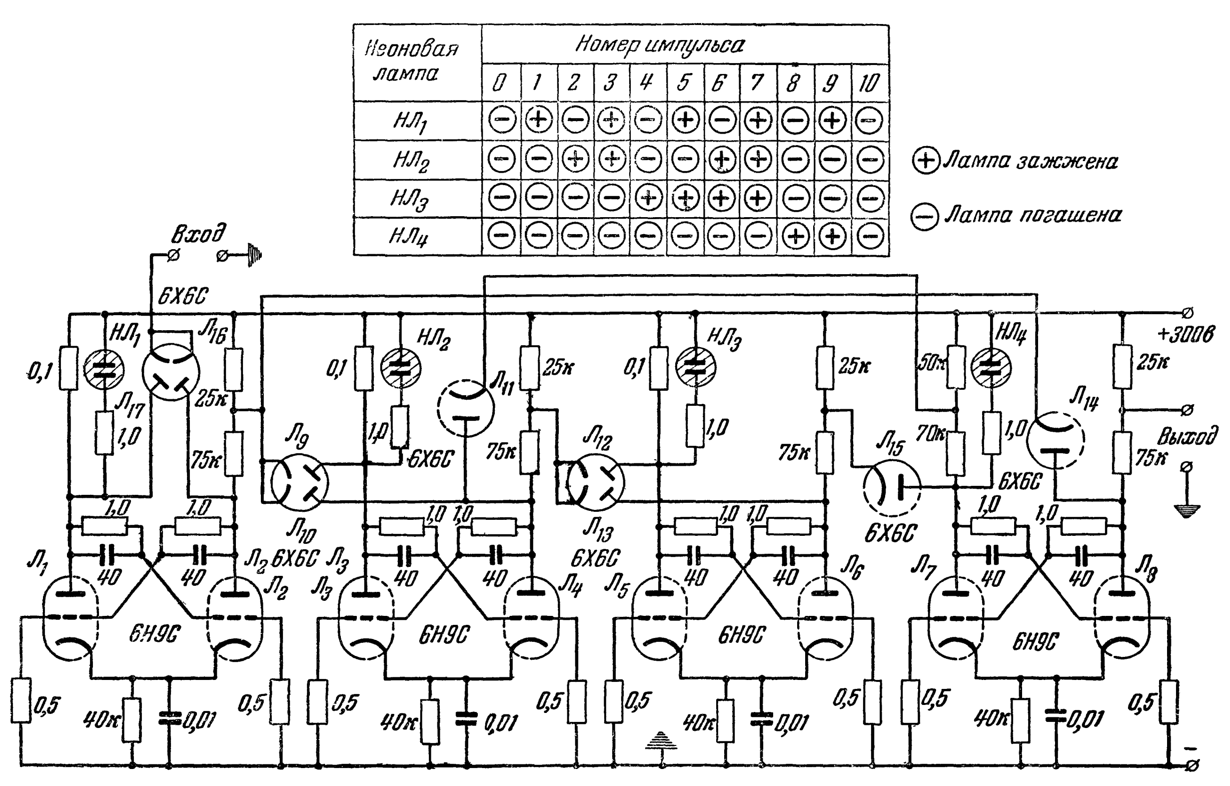
Если устройство должно обладать бо́льшим коэффициентом деления, то делительные ячейки соединяются последовательно. Тогда общий коэффициент усиления будет равен произведению коэффициентов деления отдельных ячеек.

Устройство для счета импульсов, составленное из делительных ячеек первого типа, обладает коэффициентом деления 2^n, где n — количество делительных ячеек. Такой способ подсчета не всегда удобен, так как дает ответ не в десятичной системе. Более удобен счетчик, коэффициент деления которого равен 10. Непосредственно получить такой коэффициент, используя делительные ячейки первого типа, нельзя. Поэтому в счетчик, состоящий из четырех ячеек и имеющий коэффициент $k = 16$, вводится «обратная» связь между ячейками.

Схема такого декадного счетчика приведена на рис. 104. В цепь сетки правого триода каждой делительной ячейки вводится положительное смещение (на схеме это условно не показано), включаемое для того, чтобы в исходном состоянии все правые триоды были открыты. После первого отрицательного входного импульса опрокидывается первая ячейка, причем правый триод запирается. Возникший на его аноде положительный импульс не может пройти через диод $Л_{10}$, и поэтому вторая ячейка продолжает оставаться в исходном положении. Открывшийся при этом левый триод первой ячейки зажжет неоновую лампу $НЛ_1$ (см. таблицу на рис. 104).

Второй входной импульс возвратит первую ячейку в исходное положение, погасит неоновую лампу $НЛ_1$, а возникший в цепи анода правого триода отрицательный импульс опрокинет вторую ячейку и зажжет ее неоновую лампу $НЛ_2$. Третий импульс вызовет опрокидывание первой ячейки и зажигание неоновой лампы $НЛ_1$. При этом вторая ячейка останется в прежнем положении с зажженной лампой $НЛ_2$. Четвертый импульс вызовет опрокидывание первой, второй и третьей ячеек, в результате чего неоновые лампы $НЛ_1$ и $НЛ_2$ погаснут, а лампа $НЛ_3$ зажжется.

Так будет продолжаться до восьмого импульса, который вызовет опрокидывание всех четырех ячеек, зажжет лампу $НЛ_4$, но одновременно с этим в виде отрицательного им-



Неоновая лампа	Номер импульса										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$НЛ_1$	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖	⊕	⊖
$НЛ_2$	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖	⊖
$НЛ_3$	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖	⊖	⊖
$НЛ_4$	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖

Рис. 104. Счетчик числа импульсов, составленный из четырех делительных ячеек первого типа (рис. 102) и имеющий коэффициент деления 10.

пульса с анода триода $Л_7$ через диод $Л_{11}$ попадет на анод триода $Л_4$. В этот момент триод $Л_3$ закрыт, поэтому отрицательный импульс на аноде триода $Л_4$ не вызовет изменения состояния второй ячейки, однако приведет к тому, что напряжение на аноде триода $Л_4$ будет как бы фиксировано на низком уровне, даже если триод $Л_4$ закроется.

Следующий, девятый, импульс опрокинет только первую ячейку и зажжет лампу $НЛ_1$. Если бы в схеме не было «обратной» связи, то десятый импульс опрокинул бы первую ячейку, погасив ее лампу $НЛ_1$, и опрокинул бы вторую ячейку, зажигая ее неоновую лампу $НЛ_2$. Однако из-за зафиксированного уровня напряжения на аноде триода $Л_4$ вторая ячейка не может опрокинуться. Возникший же на аноде триода $Л_2$ отрицательный импульс через диод $Л_{14}$ подается на анод триода $Л_8$ четвертой ячейки, вызывая возвращение этой ячейки в исходное состояние, при котором лампа $НЛ_4$ погашена. Тем самым все устройство возвращается в исходное положение, а на выходе появляется перепад напряжения, свидетельствующий о том, что на вход счетчика поступило 10 импульсов. Этот перепад может быть отмечен механическим счетчиком или использован для дальнейшей регистрации количества входных импульсов в следующих декадных счетчиках, подсчитывающих теперь уже десятки исследуемых импульсов.

Таким образом, при помощи декадных счетчиков легко подсчитать количество исследуемых импульсов, поступивших на счетчик в течение заданного промежутка времени. Количество десятков определяется по механическому счетчику, включенному на выходе, а количество единиц — по состоянию неоновых лампочек. Если число импульсов в секунду слишком велико и механический счетчик не успевает подсчитать даже их десятки, то последовательно с первым включатся второй декадный счетчик. Тогда механический счетчик, включенный на его выходе, будет подсчитывать сотни импульсов, а десятки и единицы определяются по состоянию неоновых лампочек.

ЛИТЕРАТУРА

Ицхоки Я. С., Импульсная техника, Советское радио, 1949.

Кривицкий Б. Х., Импульсные схемы и устройства, „Советское радио", 1955.

Енютин В. В. и Никулин С. М., Спусковые устройства, Госэнергоиздат, 1957.

Петрович Н. Т. и Козырев А. В., Генерирование и преобразование электрических импульсов, Советское радио, 1954.

Шумихин Ю. А., Введение в импульсную технику, Госэнергоиздат", 1952.

Изюмов Н. М., Импульсные системы многоканальной связи, Воениздат, 1947.

Евдокимов П. И., Методы и системы многоканальной радиосвязи, Госэнергоиздат, 1952.

Соболевский А. Г., Электронно-лучевой осциллограф, Госэнергоиздат, 1956.

Благовещенский В. П. и Сидоренко В. В., Измерения в импульсной радиоаппаратуре, Судпромгиз, 1957.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 3 руб. 85 коп.